

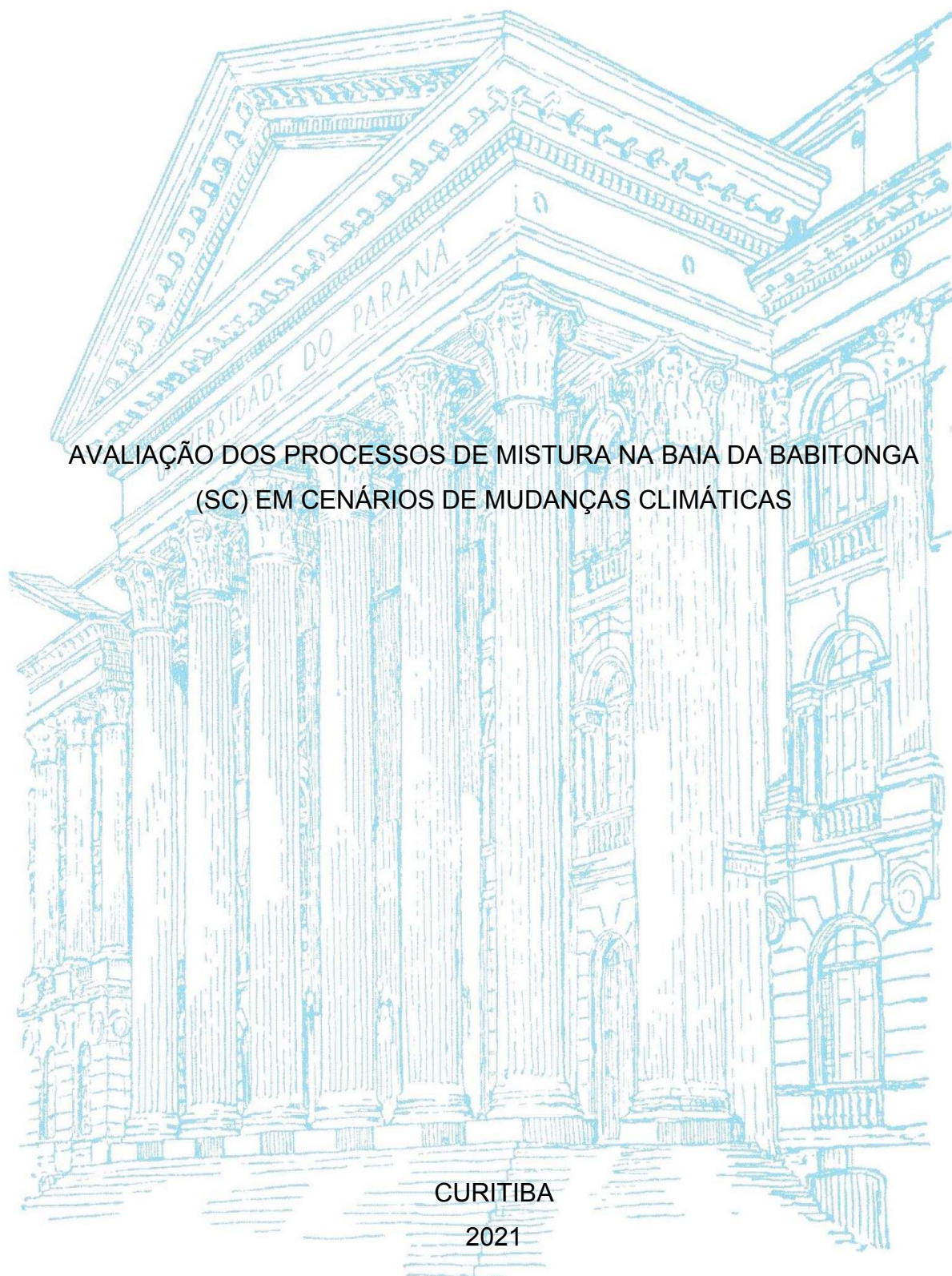
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANNA CAROLINA ALVES DE ABREU

AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MISTURA NA BAIÁ DA BABITONGA  
(SC) EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

CURITIBA

2021



ANNA CAROLINA ALVES DE ABREU

AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MISTURA NA BAIA DA BABITONGA  
(SC) EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Dissertação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.  
Orientadora: Profa. Dra. Cynara Lourdes de Nóbrega da Cunha.

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

A162a

Abreu, Anna Carolina Alves de

Avaliação dos processos de mistura na Baía da Babitonga (SC) em cenários de mudanças climáticas [recurso eletrônico]/ Anna Carolina Alves de Abreu - Curitiba, 2021.

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profª. Dra. Cynara Lourdes de Nóbrega da Cunha

1. Hidrodinâmica. 2. Mudanças climáticas. I. Cunha, Eduardo Cunha Cynara Lourdes de Nóbrega da. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 532.5

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
AMBIENTAL - 40001016075P3

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANNA CAROLINA ALVES DE ABREU** intitulada: **AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MISTURA NA BAIJA DA BABITONGA (SC) EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**, sob orientação da Profa. Dra. CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 08 de Junho de 2021.

Assinatura Eletrônica

09/06/2021 09:37:13.0

CYNARA DE LOURDES DA NÓBREGA CUNHA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

09/06/2021 06:07:21.0

LUIS HAMILTON POSPISSIL GARBOSA

Avaliador Externo (EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA)

Assinatura Eletrônica

08/06/2021 19:53:12.0

MAURÍCIO FELGA GOBBI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico da UFPR - Curitiba - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3012 - E-mail: ppgea@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 96260

**Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 96260**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente e acima de todas as coisas, a Deus por ter me capacitado para completar mais essa fase da minha vida acadêmica.

Aos familiares e amigos, obrigada por todo suporte e apoio incondicional.

À minha orientadora, Professora Dr. Cynara L. de N. da Cunha, obrigada por todas as orientações, correções e auxílios, além da partilha de seus conhecimentos.

Agradeço também ao Dr. Luís H. Garbossa, e ao Professor Dr. Mauricio F. Gobbi, pelas sugestões e avaliações em minha banca.

À EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina), obrigada pelo auxílio e fornecimento de dados que possibilitaram a realização desse estudo.

Agradeço, também, ao professor Doutor Mauricio Noerberg pelo fornecimento dos dados de velocidade e pelos trabalhos realizados na baía da Babitonga.

E finalmente, agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo financiamento através da concessão da bolsa de estudos ao longo desses 2 anos.

## RESUMO

A baía da Babitonga, localizada na região norte do estado de Santa Catarina, é um sistema estuarino de grande importância social e econômica, devido à presença de grandes instalações portuárias e de centros urbanos. Estas regiões estão suscetíveis à sofrerem com as modificações climáticas globais que impactarão principalmente nas áreas costeiras, as mudanças previstas incluem as variações do nível médio do mar (NMM), mudanças nos regimes pluviométricos e alterações no campo de ventos. Este estudo teve como objetivo analisar os efeitos gerados pelas variações do NMM projetados pelo *IPCC – International Panel on Climate Change*, nos indicadores de mistura, taxa de renovação e idade da água, da baía da Babitonga, usando a modelagem numérica e utilizando o sistema computacional SisBaHiA® (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). Inicialmente, os modelos de circulação e de transporte de calor do SisBaHiA® foram calibrados e validados para o ano de 2019, obtendo uma excelente concordância. Após a calibração e validação dos modelos, foram calculadas as taxas de renovação e as idades da água para os cenários de verão e inverno de 2019, e para quatro cenários projetados para 2100, com níveis de radiação intermediários (RCP 4.5) e altos (RCP 8.5). A partir das idades da água e taxas de renovações calculadas para regiões da baía da Babitonga, foi possível definir áreas de estagnação na baía, as regiões do Canal do Linguado e nas proximidades da Ilha Grande. As regiões no meio do canal principal e próximo ao Canal do Palmital são as que apresentaram maiores oscilações devido à influência da maré e da vazão do rio Cubatão, respectivamente. Também foi possível observar as diferenças nos processos de renovação na baía durante o verão, como maiores vazões, e o inverno, com menor aporte de água doce. No verão, o processo de renovação é mais eficiente, devido à influência das vazões no sistema. Ao comparar os resultados obtidos de taxa de renovação e idade da água entre o cenário de 2019, cenário de 2100 com RCP 4.5 e cenário de 2100 com RCP 8.5, foi possível verificar que há uma diminuição das taxas de renovação e um aumento da idade da água para ambos os cenários de 2100, se comparados com o cenário de 2019, estas diferenças encontradas entre os cenários são maiores para o período de inverno do que para o período de verão.

**Palavras-chaves:** Hidrodinâmica, Taxa de renovação, Idade da água, Indicadores de Mistura, Mudanças Climáticas, SisBaHiA®, baía da Babitonga.

## ABSTRACT

The Babitonga Bay, located in the northern region of the state of Santa Catarina, is an estuarine system of great social and economic importance due to its large port facilities, and cities in the state of Santa Catarina which may suffer from global climate changes that will impact coastal regions. These impacts include changes in Mean Sea Level (MSL), changes in rainfall patterns and in the wind field. This study intended to analyze the effects generated by the MSL variations, projected by the IPCC – International Panel on Climate Change, on the mixing indicators, i.e. Renewal Rate and Water Age in the Babitonga Bay, using numerical modelling and the computational system SisBaHiA® (Base System of Environmental Hydrodynamics). Initially, the circulation and heat transport models in the SisBaHiA® were calibrated and validated for the year 2019, resulting in an excellent fit. After calibrating and validating the models, Renewal Rate and Water Ages were calculated for the scenarios of summer and winter of 2019, and also for four different projected scenarios for the year 2100, considering an intermediate (RCP 4.5) and a high (RCP 8.5) radiation level. From the mixing indicators, it was possible to define areas of stagnation in the bay, the region of the Linguado Channel and in the vicinity of “Ilha Grande”. The middle region of the main channel and the regions close to the Palmital Channel are the ones which showed greater oscillations caused, respectively, by the influence of the tide and the flow of the Cubatão River. It was also possible to observe the differences in the renovation processes in the bay during the summer, such as higher flows, and during the winter, with less freshwater supply. The renovation process is more efficient in the summer because of the influence of the flows rates in the system. When comparing the results obtained for the 2019 Renewal Rate and Water Age with the scenario of 2100 with RCP4.5 and the scenario of 2100 with RCP 8.5, it was possible to verify a decrease in the Renewal Rates and increase in Water Ages for both projected scenarios, using the 2019 results as the comparison base. We could also observe that these differences are accentuated in the winter period, if compared to summer periods.

**Keywords:** Hydrodynamics, Renewal Rate, Water Age, Mixture Indicators, Climate Change, SisBaHiA®, Babitonga Bay.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação esquemática das zonas estuarinas: zona Fluvio-marítima, zona de Mistura e zona Marítima (zona Costeira). .....	21
FIGURA 2 - Representação dos fatores que exercem influência sobre uma região estuarina.....	23
FIGURA 3 – Localização da baía da Babitonga (SC) com a definição do domínio de modelagem.....	35
FIGURA 4- a) Domínio da modelagem e malha de discretização. b) Batimetria da baía da Babitonga, em metros e c) Amplitude da rugosidade de fundo, em metros. ....	41
FIGURA 5 – Curvas de maré medida na Estação da Ilha da Paz, a maré astronômica e as médias móveis para um período de 24 horas da maré astronômica (vermelho) e medida(preto) entre 12/01/2019 a 12/03/2019.....	42
FIGURA 6 - Curva da maré medida na Estação da Ilha da Paz e a maré astronômica para o período entre 12/01/2019 a 12/03/2019. Em vermelho e preto pode-se observar as médias móveis para um período de 24 horas da maré astronômica e da curva de maré medida na Ilha da paz.....	43
FIGURA 7 – Rosa dos ventos para o período de verão de 2019 e inverno de 2019 na estação de Itapoá- SC.....	45
FIGURA 8 – Mapa da subdivisão das microbacias na região da baía da Babitonga. ....	46
FIGURA 9 - Localização do ponto de onde foram extraídos os dados de onda e o estado do mar do SMC (ponto DOW) e a localização dos três pontos de controle (direita). É possível também observar a batimetria e a malha usada na propagação dos casos. ....	52
FIGURA 10 – Valores de projeção da elevação do nível médio do mar e retrocesso da linha da costa para cenários futuros. ....	53
FIGURA 11 – Mapa da baía da Babitonga, com a localização das estações marégrafas da Ilha da Paz, porto de Itapoá, Terminal de Santa Catarina II (TESC II) e late Clube de Joinville, onde foram medidos valores da posição da superfície livre pela Epagri, e a estação no Canal do Palmital.....	55



FIGURA 12 - Comparação entre as densidades espectrais da componente Leste-Oeste da velocidade durante o inverno e média de 32 densidades espectrais de dados de correntes. ....	57
FIGURA 13 - Comparação entre a componente Leste-Oeste da velocidade medida e filtradas, considerando um filtro para 4 e 6 horas, durante o inverno. ....	58
FIGURA 14 - Imagem da tela de modelos hidrodinâmicos do SisBaHiA® com os valores dos parâmetros usados no processo de calibração e validação. ....	61
FIGURA 15 - Imagem da tela de modelos de qualidade de água, para a temperatura com os valores dos parâmetros usados no processo de calibração e validação. ....	62
FIGURA 16 - Imagem da tela dos parâmetros utilizados para simular a Idade da água e Taxa de Renovação. ....	63
FIGURA 17 – Valores de posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do porto de Itapoá e simulados pelo SisBaHiA®, para o verão de 2019. ....	67
FIGURA 18 – Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do Terminal de Santa Catarina – TESC II e simulados pelo SisBaHiA® para o verão de 2019. ....	68
FIGURA 19 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do late Clube de Joinville e simulados pelo SisBaHiA® para o verão de 2019. ....	69
FIGURA 20 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas do porto de Itapoá. ....	69
FIGURA 21 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas de São Francisco – TESC II. ....	70
FIGURA 22 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas do late Clube de Joinville. ....	70
FIGURA 23 - Componente Norte-Sul das velocidades de correntes (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, para o período de verão de 2019. ....	72

FIGURA 24 - Diagrama de dispersão da componente Norte-Sul das velocidades de correntes medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital.....	72
FIGURA 25 - Componente Leste-Oeste das velocidades de correntes (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, para o período de verão de 2019. ....	73
FIGURA 26 - Diagrama de dispersão da componente Leste-Oeste das velocidades de correntes medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital.....	73
FIGURA 27 - Valores de temperatura medida e calculada no Canal do Palmital para entre os dias 24 de janeiro de 2019 à 11 de fevereiro de 2019. ....	75
FIGURA 28 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do porto de Itapoá e simulados pelo SisBaHiA®, para o inverno 2019.....	76
FIGURA 29 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa de São Francisco do Sul – TESC II e simuladas pelo SisBaHiA®, para o inverno de 2019.....	77
FIGURA 30 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do late Clube de Joinville simuladas pelo SisBaHiA®, para o inverno de 2019.....	78
FIGURA 31 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa de porto de Itapoá. ....	79
FIGURA 32 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa de Terminal de Santa Catarina II.....	80
FIGURA 33 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa do late Clube de Joinville. ....	80
FIGURA 34 - Valores das Componentes de velocidade Norte – Sul (m/s) calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, apresentados pelo eixo principal, para o período de inverno de 2019.....	81
FIGURA 35 - Diagramas de dispersão da componente Norte-Sul da velocidade medidas e simuladas, para o inverno de 2019, no Canal do Palmital .....	82

FIGURA 36 - valores das componentes de velocidade Leste- Oeste (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, apresentados pelo eixo principal, para o período de inverno de 2019.....	82
FIGURA 37 - Diagramas de dispersão da componente Leste- Oeste da velocidade medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital	83
FIGURA 38 - Valores de temperatura medida e calculada no Canal do Palmital para entre os dias 18 de junho de 2019 a 01 de julho de 2019.....	84
FIGURA 39 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa do Porto de Itapoá para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....	85
FIGURA 40 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa de São Francisco – TESC II para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 .....	86
FIGURA 41 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa de late Clube de Joinville para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 .....	86
FIGURA 42 – Módulo da velocidade (m/s) para um ciclo no período de sizigia, contemplando os instantes de meia maré de enchente, preamar, meia maré vazante e baixamar, para o dia 20 de janeiro de 2019, período de verão.....	88
FIGURA 43 - Módulo da velocidade para um ciclo de maré de sizigia, contemplando maré de enchente, preamar, maré vazante e baixamar, para o dia 05 de maio de 2019, período de inverno. ....	89
FIGURA 44 – Isolinhas de ocorrência de velocidades de corrente acima de 0,30 m/s, para o verão de 2019, e os cenários de verão de 2100, com variação correposndente a RCP 4.5 e RCP8.5. ....	91
FIGURA 45 - Isolinhas de ocorrência de velocidades de corrente acima de 0,30 m/s, para o inverno de 2019, e os cenários de inverno de 2100, com variação correpondente a RCP 4.5 e RCP8.5. ....	92
FIGURA 46 - Indicação dos locais de análise da taxa de renovação e idade da água na baía da Babitonga. ....	94
Figura 47 – Média Móvel de 24 horas da Taxa de Renovação nas estações A, B, C, D, E e F para o período de verão de 2019. ....	96
Figura 48 - Média Móvel de 24 horas da Taxa de Renovação nas estações A, B, C, D, E e F para o período de inverno de 2019. ....	97

FIGURA 49 – Isolinhas de Taxa de Renovação, em %, na baia da Babitonga para os períodos de inverno e verão de 2019. ....	98
FIGURA 50 - Média Móvel de 24 horas da Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo para o período de verão de 2019, nas estações A. B, C, D, E.e F.....	100
FIGURA 51 - Média Móvel de 24 horas da Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo para o período de Inverno de 2019, nas estações A. B, C, D, E. e F.....	101
FIGURA 52- Isolinhas de Idade da água da baia da Babitonga para o período de verão e inverno de 2019 para 90 dias de simulação .....	102
FIGURA 53 - Comparação entre as taxas de renovação do período de verão para os cenários de 2019 (laranja), RCP 4.5 (amarelo) e RCP 8.5 (cinza). ...	103
FIGURA 54 - Comparação entre as taxas de renovação do período de inverno para os cenários de 2019 (laranja), RCP 4.5 (amarelo) e RCP 8.5 (cinza). ....	104
FIGURA 55 - Isolinhas de Taxa de Renovação (%) para os diferentes cenários de verão a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5 simulados para 90 dias .....	108
FIGURA 56 - Isolinhas de Taxa de Renovação (%) para os diferentes cenários de inverno a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5, simulados para 90 dias.....	109
FIGURA 57 - Isolinhas de Idade da Água (dias) para os diferentes cenários de verão a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5 simulados para 90 dias. ....	110
FIGURA 58- Isolinhas de Idade da Água (dias) para os diferentes cenários de inverno a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5, simulados para 90 dias. ....	111

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Cenários baseados em emissões de GEE do IPCC com a descrição de acordo com a forçante radioativa. ....	28
TABELA 2 – Variação global da temperatura média da superfície da terra e da elevação do nível médio do mar (média e intervalo de variação) para os cenários futuros projetados pelo IPCC. ....	29
TABELA 3 – Dados das micro bacias na região da baía da Babitonga: área, comprimento e declividade. ....	46
TABELA 4 – Precipitações mensais entre os anos de 2010 e 2020 na estação de Itapoá- SC. ....	47
TABELA 5 – Vazões média estimadas para verão e inverno, a partir do modelo racional modificado. ....	48
TABELA 6 – Mediana da variação do Nível do Médio do Mar e intervalo de confiança (IC90%), em metros, para os anos de 2070 e 2100, considerando diferentes cenários do IPCC. ....	53
TABELA 7- Valores indicados para o erro absoluto médio relativo. ....	59
TABELA 8 - Valores dos índices estáticos: coeficiente de correlação de Pearson (r), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência (E) entre os dados medidos e calculados da variação da superfície livre nas estações marégrafas. ....	71
TABELA 9- Valores dos índices estáticos; coeficiente de correlação (r), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência (E) entre os dados medidos e calculados para as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste de velocidade no Canal do Palmital durante o verão. ....	74
TABELA 10 - Valores de correlação (r), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência (E) para os dados medidos e calculados da variação da superfície livre nas estações marégrafas. ....	80
TABELA 11 - Valores de correlação (r), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência (E) para os dados medidos e calculados para as componentes da velocidade N - S(m/s), sentido Norte/S, e velocidade L-O (m/s) no Canal do Palmital. ....	83
TABELA 12- Estações para análise da taxa de renovação e idade da água para os cenários atuais e de mudanças climáticas. ....	94

TABELA 13- Valores de taxa de renovação para as estações A, B, C, D, E e F para os períodos de inverno e verão para os diferentes cenários de 2019, 2100 com RCP 4.5 e 2100 com RCP8.5, com destaque para a maior e menor taxa de renovação..... 105

TABELA 14 - Valores de idade da água para as estações A, B, C, D, E e F para os períodos de inverno e verão para os diferentes cenários de 2019, 2100 com RCP 4.5 e 2100 com RCP8.5, com destaque para a maior e menor taxa de renovação..... 106

## LISTA DE ABREVIATURAS

EPAGRI- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

GEE – Gases do Efeito Estufa

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital do Terreno

NCAR - *National Center for Atmospheric Research*

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

NMM – Nível Médio do Mar

RCP – *Representative Concentration Pathway*

SisBaHiA® – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

SMC-Brasil – Sistema de Modelagem Costeira do Brasil

TESC II – Terminal de Santa Catarina II – São Francisco do Sul

## SÚMARIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	CONTEXTO E PROBLEMA .....	16
1.2	OBJETIVOS .....	19
1.2.1	Objetivo Geral .....	19
1.2.2	Objetivos Específicos .....	19
<b>2.</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	BAÍAS E ESTUÁRIOS.....	21
2.2	FORÇANTES HIDRODINÂMICAS.....	22
2.3	PROCESSOS DE MISTURA .....	25
2.4	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NOS ESTUÁRIOS ..	27
2.5	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS.....	31
2.6	ESTUDOS NA BAÍA DA BABITONGA .....	32
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>34</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.2	SISBAHIA® .....	37
3.3	DADOS .....	38
3.3.1	Domínio de Modelagem .....	39
3.3.2	Maré .....	41
3.3.3	Vento .....	44
3.3.4	Vazões Fluviais.....	45
3.3.5	Elevação do Nível Médio do Mar .....	49
3.4	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO .....	53
3.4.1	Dados Medidos.....	53
3.4.2	Indicadores Estatísticos .....	58
3.4.3	Parâmetros do modelo.....	60



<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
4.1	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	65
4.1.1	Calibração do Modelo Hidrodinâmico .....	65
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	75
4.3	HIDRODINÂMICA EM CÉNARIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICAS.....	84
4.4	INDICADORES DE MISTURA .....	93
4.4.1	<b>Cenário de 2019 .....</b>	<b>94</b>
4.5	ÍNDICES DE MISTURA PARA O CENÁRIO 2019, CENÁRIO DE 2100 COM RCP 4.5 E CENÁRIO DE 2100 COM RCP 8.5.....	102
4.6	APLICAÇÕES PRÁTICAS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS.....	112
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>114</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>116</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

As mudanças climáticas têm sido um tema recorrente na literatura por conta dos impactos previstos para cenários futuros a partir da estimativa da concentração e da emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, como, por exemplo, o dióxido de carbono. Os estudos atuais desenvolvidos sobre mudanças climáticas no Brasil têm ênfase na elevação da temperatura média global, na influência que o desmatamento da Amazônia exerce sobre o ciclo hidrológico, e os eventos extremos, considerando as modificações na circulação atmosférica e na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera (CONTI, 2005; IPCC, 2013; SANCHEZ. A., 2009; MARENGO & SOUZA, 2018). No entanto, são mais complexas e incertas as projeções referentes à influência e aos impactos que os fenômenos resultantes dessas modificações podem ocasionar sobre as regiões costeiras. Desse modo, o presente trabalho busca abordar os impactos que as mudanças climáticas podem gerar na circulação hidrodinâmica e nos processos de mistura em um estuário, contribuindo para auxiliar a tomada de decisão, como por exemplo, a formulação de políticas públicas e o gerenciamento de portos e estuários.

Segundo a Agenda 21 (1992), cerca de 60% da população mundial vive em regiões costeiras que estão em crescente desenvolvimento econômico, contando com diversas atividades extensivas. Desta forma, estes locais estão sujeitos à degradação ambiental, com a alteração do uso e ocupação das margens da região costeira, influenciando significativamente a qualidade da água. Neste contexto, é importante considerar o manejo adequado destas áreas e prever os efeitos das alterações climáticas globais, pois são regiões extremamente suscetíveis aos impactos decorrentes destas modificações.

As modificações climáticas globais que poderão impactar as regiões costeiras incluem as variações do nível médio do mar (NMM), mudanças nos regimes pluviométricos das regiões por efeito da intensificação de eventos meteorológicos extremos, e alterações no campo de velocidade dos ventos (VENTURA, 2011). Segundo o IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate*

*Change* (2013), o NMM global subiu 0,19 m no período entre 1901-2010, e prevê uma continuidade dessa elevação, que pode ocorrer de maneira mais ou menos abrupta.

As variações relacionadas à elevação do nível médio do mar podem gerar impactos sobre a circulação hidrodinâmica e os processos de mistura em um sistema estuarino, ambientes de transição entre o oceano e o continente. Por definição, estuários são corpos de água costeiros semifechados, de ligação livre com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce e que se estendem ao longo do rio até o limite de influência da maré (PRITCHARD, 1955). Em razão da ocorrência da mistura entre as massas d'água fluviais e marinhas, os estuários tornam-se áreas com características peculiares que favorecem o desenvolvimento de atividades econômicas e de lazer. Além disso, por apresentarem grandes quantidades de nutrientes, são sistemas biologicamente produtivos, com grande importância para a comunidade, sendo fonte de alimentação e renda (MIRANDA, 2012).

Nos estuários, a circulação e os processos de mistura entre as massas de água são complexos, com variações espaciais e temporais importantes (PEREIRA & NETO, 2019), e são influenciados por diversas forças que, simultaneamente, afetam tanto a distribuição espacial e temporal, quanto a variabilidade de substâncias naturais (como a salinidade, nutrientes e sedimentos) e de organismos biológicos. O conhecimento dessas forças e como atuam em um estuário, é de grande importância para a correta caracterização dos processos de mistura (MIRANDA, 2012). Segundo Dyer (1998), pode-se citar as marés, o aporte fluvial e o vento, como as principais forças atuantes em um sistema estuarino.

Em relação aos processos de mistura do estuário, pode-se citar a taxa de renovação e idade da água como indicadores da mistura de massas d'água. Estes parâmetros auxiliam diretamente a avaliação da qualidade da água, sendo possível obter o tempo que as massas d'água ficam retidas no interior do estuário, facilitando deste modo a identificação de áreas de estagnação. A taxa de renovação pode ser entendida como a taxa de troca de água dentro de um determinado volume de controle, que informa o quanto por cento desse volume

de água foi renovado. O complemento da taxa de renovação é a porcentagem da água não-renovadas. A idade da água pode ser definida como o tempo decorrido desde que uma partícula de água entrou no sistema, ou seja, o tempo que uma determinada massa d'água permanece em uma região específica. De modo geral, corpos d'água com taxas de renovação elevadas e com águas mais "novas" (idade da água menor) teriam menos problemas relacionados à qualidade de água.

Semelhantemente a outras regiões costeiras, a baía da Babitonga, localizada no norte do estado de Santa Catarina, região sul do Brasil, também pode sofrer impactos decorrentes das alterações climáticas, com as mudanças do regime de precipitações, do NMM e a intensificação de eventos extremos, alterando, assim, sua circulação e os processos de misturas que ocorrem na região. A baía da Babitonga apresenta uma área de aproximadamente 160 km<sup>2</sup>, com uma bacia hidrográfica que cobre uma área de 1560 km<sup>2</sup> que se estende por seis municípios (PAITACHE *et al.*, 2017); a região também abriga o porto de São Francisco do Sul, o porto de Itapoá, o terminal Graneleiro da Babitonga, o terminal Gás Sul, entre outros empreendimentos que, potencialmente, geram impactos ambientais.

Considerando que a região em questão é de grande importância econômica e social, justifica-se o estudo da circulação hidrodinâmica e dos processos de mistura em que nela ocorrem, tendo em vista os cenários atuais e considerando os efeitos das modificações climáticas. A hipótese principal a ser analisada neste estudo é que as variações do NMM decorrentes das mudanças climáticas modificam os processos de renovação dos poluentes no sistema estuarino da Babitonga sendo, portanto, uma importante ferramenta de gestão, possibilitando conhecer os processos de mistura e o tempo que os constituintes ficam retidos no seu interior, relacionando com as forçantes, maré, vento ou aporte fluvial, identificando ainda possíveis áreas de estagnação. Para tanto, são analisadas alterações na hidrodinâmica, como os módulos de velocidade e variação da superfície livre, e nas taxas de renovação e idades da água como indicadores dos processos de mistura, usando a modelagem computacional.

O sistema computacional utilizado na definição da hidrodinâmica e dos indicadores de mistura será o SisBaHiA - Sistema de Base de Hidrodinâmica Ambiental -, que consiste em um conjunto de modelos computacionais para corpos d'água naturais, desenvolvido pela área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, capaz de realizar a modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de substâncias, utilizando o método dos elementos finitos na discretização espacial, e o método das diferenças finitas na discretização temporal (ROSMAN, 2021).

Com o intuito de analisar as alterações na hidrodinâmica resultantes das projeções de mudanças climáticas, o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC – Brasil) foi utilizado para definir projeções da elevação do nível médio do mar na região da baía da Babitonga, segundo os cenários definidos pelo IPCC.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as diferenças na circulação hidrodinâmica e nos processos de mistura na baía da Babitonga, para os cenários atuais e previsões de cenários futuros, considerando as mudanças climáticas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para à análise das diferenças hidrodinâmicas e nos processos de mistura na baía da Babitonga, são:

- Análise e tratamento de dados existentes para implantação e desenvolvimento dos modelos;
- Definição das vazões fluviais afluentes à baía da Babitonga para o período de verão e inverno, utilizando o método racional;
- Validação e calibração do modelo de circulação hidrodinâmica;
- Validação e calibração do modelo de transporte de calor;
- Análise dos efeitos causados pelo aumento do nível médio do mar para cenários futuros de mudanças climáticas, na circulação hidrodinâmica;

- Análise dos processos de mistura, calculando os indicadores taxa de renovação e idade da água para o cenário atual e para os cenários futuros, considerando a elevação do NMM, comparando com os valores calculados para a situação atual da baía da Babitonga.

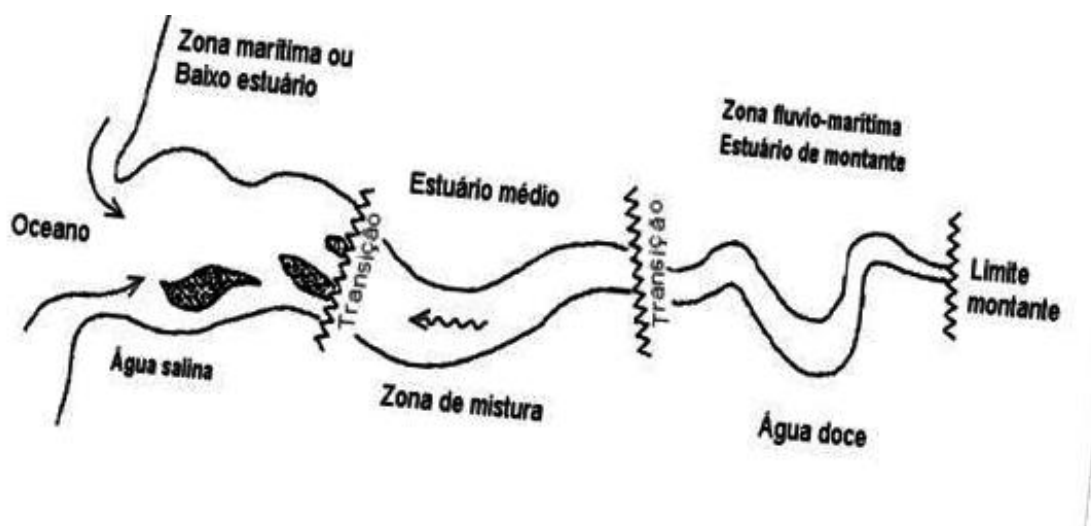
## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 BAÍAS E ESTUÁRIOS

Uma das definições mais aceitas para estuários, do ponto de vista físico, é a proposta por Pritchard (1955), que define o estuário como corpos de água costeiros semifechados, que possuem livre conexão com o mar aberto, e nos quais a água do mar é mensuravelmente diluída com a água doce oriunda da drenagem continental.

Visto que a definição de Pritchard (1955) contempla apenas as regiões da zona de mistura e da influência da água marinha, Fairbridge (1980) seccionou a formação do estuário em três zonas distintas (figura 1): (i) zona fluvial, caracterizada pela ausência de salinidade, mas afetada pelo ciclo de maré; (ii) zona de mistura, onde ocorrem fortes gradientes físicos, químicos e biológicos, por conta do encontro das massas fluviais e marinhas; e (iii) zona marítima (zona costeira), situada na região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina.

FIGURA 1 – Representação esquemática das zonas estuarinas: zona Fluvio-marítima, zona de Mistura e zona Marítima (zona Costeira).



FONTE: Correia et al., 2016 *apud* Fairbridge, 1980.

As baías, por sua vez, são uma porção de mar ou oceano rodeada por terra, em oposição a um cabo, e podem ser caracterizadas por reentrâncias na costa litorânea em que o mar avança para o interior do continente, comumente abrange os sistemas estuarinos por serem locais de transição entre o oceano adjacente e os fluxos fluviais provenientes da drenagem continental.

A baía da Babitonga é um complexo estuarino muito recente, classificado como ria (MAZZER & GONÇALVES, 2011). As rias têm origem tectônica, formadas pela elevação da parte continental onde vales dos rios se localizavam, aliviados pelo peso de glaciares durante o descongelamento. Geralmente possuem morfologia irregular (afunilada), com meandros inundados (MIRANDA, 2012).

Noenrberg *et al.* (2020) evidencia que os estudos sobre as características físicas da baía da Babitonga são escassos e limitados. Portanto são necessários maiores estudos para buscar compreender as características físicas deste sistema estuarino que é a baía da Babitonga.

## 2.2 FORÇANTES HIDRODINÂMICAS

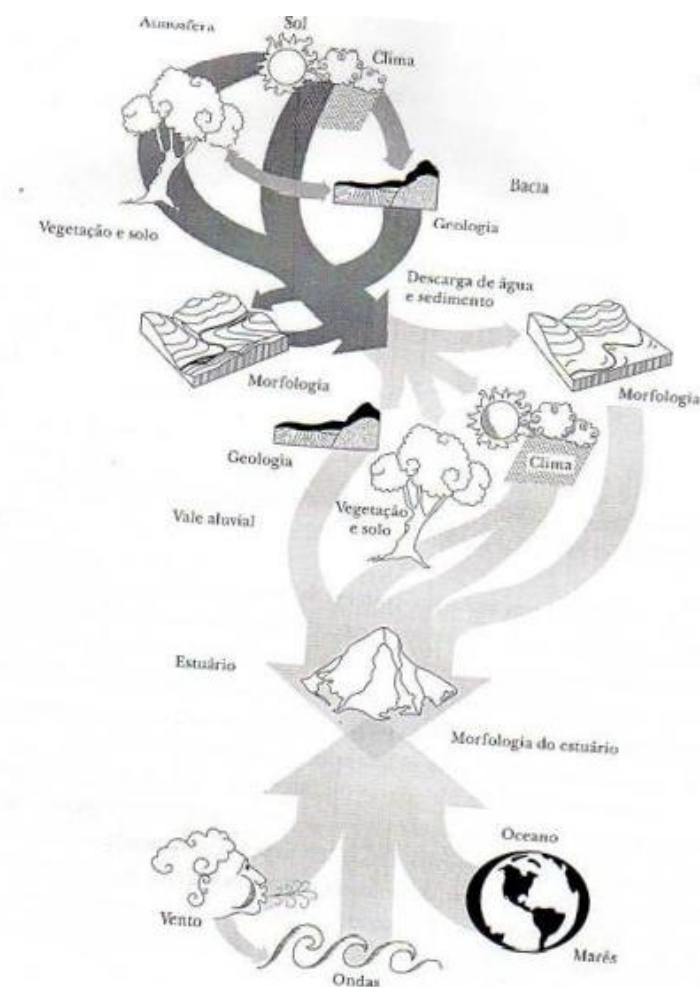
Regiões estuarinas são extremamente sensíveis a fenômenos em diferentes escalas temporais e espaciais, gerados pela ação de eventos climáticos, oceanográficos, geológicos e hidrológicos que ocorrem tanto na bacia de drenagem, quanto no oceano adjacente.

Coleman & Wright (1971) ilustram os processos e as forçantes de uma região estuarina, mostrando o dinamismo desses ambientes. Destacam que as vazões fluviais, que são responsáveis pelo suprimento de água doce no sistema, transportam sedimentos e substâncias provenientes da região continental para a região estuarina. Por sua vez, a vazão de água doce recebida dependerá da bacia de contribuição, que está diretamente relacionada com as condições climáticas, características do solo, cobertura vegetal, ocupação urbana, e taxas de evapotranspiração. Por fim, a região costeira adjacente contribuirá na região estuarina com os efeitos provocados pelas ondas, ventos, e fenômenos



climáticos e astronômicos, tais como maré, conforme ilustrado na figura 2 (COLEMAN & WRIGHT, 1971).

FIGURA 2 - Representação dos fatores que exercem influência sobre uma região estuarina.



FONTE: Coleman & Wright, 1971.

Segundo Parker (1991), a região costeira adjacente influencia a circulação, a dinâmica e os processos de mistura estuarinos com diversas forçantes, como, por exemplo, as marés meteorológicas, as marés astronômicas e as ondas de gravidade. A circulação hidrodinâmica e os processos de misturas são influenciados pela ocorrência de múltiplos fatores, sendo as principais forçantes:

- A oscilação da maré na embocadura do estuário gera um gradiente na superfície livre, que, por sua vez, promovem correntes marítimas que podem ser de enchente ou de vazante. (MIRANDA, 2012);

- O vento é uma forçante que favorece a mistura das massas de água estuarinas e costeiras, podendo gerar erosões e gradientes verticais de salinidade. Essa forçante pode ocasionar correntes e ondas em estuários com grandes áreas superficiais, intensificando as misturas (MIRANDA, 2012);

- A descarga fluvial, ou vazão do rio, são o transporte de água doce em um estuário (MIRANDA, 2012). As águas fluviais produzem efeitos variados na estrutura dos ambientes estuarinos, alterando o processo de mistura das águas e as características físico-químicas (DYER, 1998). Na superfície, o balanço hídrico resultante da precipitação, descarga fluvial e evapotranspiração é sempre positivo, ou seja, os valores de precipitação e vazão são, de maneira geral, superiores aos da evapotranspiração. O balanço hídrico pode ser influenciado também pela temperatura, direção e intensidade do vento, umidade do ar, uso do solo e cobertura vegetal (CRONIN, 1967).

Além das forçantes hidrodinâmicas, a geomorfologia do estuário tem relação direta com o padrão de circulação hidrodinâmica. Especificamente, pode-se citar a batimetria. A batimetria influencia na propagação das ondas no interior do estuário; as alterações geradas no relevo de fundo podem gerar mudanças nas velocidades e nos fluxos de vazante e enchente, assim como no tempo de residência, impactando a qualidade da água no estuário (ZACARIAS, 2011).

Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de identificar os principais efeitos de cada forçante sobre o padrão de circulação hidrodinâmica em regiões de baía e estuários. Miranda (2016) estudou as respostas, na circulação hidrodinâmica, no Complexo Estuarino de Paranaguá, com base nas ações dos ventos gerados por passagens de frentes frias na região. Concluiu que a maré meteorológica é o fator predominante com relação as variações do nível médio do mar em escalas de dias, causando uma elevação no nível médio da água de até 0,40 metros. Freitas (2015) estudou a variabilidade espacial e

temporal da circulação na região do estado do Ceará, Brasil, quantificando as principais forçantes da circulação hidrodinâmica, realizando simulações específicas para cada forçante. Observou que as vazões fluviais apresentam efeitos significativos, resultando em grandes diferenças sazonais no padrão de circulação. A hidrodinâmica da região estuarina de Manguaba foi estudada por Cunha et al.(2021), que realizaram simulações de variações sazonais das vazões fluviais, que resultaram em significativas alterações hidrodinâmicas e nos processos de mistura. Camargo et al. (2004), ao verificar as variações na circulação hidrodinâmica na Baía de Guanabara encontraram uma forte correlação entre o efeito de ventos fortes e ondas de longo período, e o aumento do transporte sedimentar.

### 2.3 PROCESSOS DE MISTURA

A mistura em um estuário é baseada na combinação de dois efeitos: a variação, no tempo e no espaço, do campo de velocidades médias advectivas e da difusão turbulenta (ROSMAN, 2021).

É possível caracterizar diferentes parâmetros associados aos processos de mistura, como a idade da água, tempo de retenção hidráulica, tempo de residência, taxa de renovação, entre outros. Existem diversas nomenclaturas para representar os processos de mistura, e apesar de possuírem conceitos similares, podem apresentar métodos de cálculos distintos.

Os parâmetros usados neste trabalho para descrever os processos de mistura são a idade da água e taxa de renovação. A taxa de renovação pode ser considerada como as trocas de água que ocorrem dentro de um determinado volume de controle, no caso o domínio de modelagem, informando o percentual desse volume de água que foi renovado durante um determinado período de tempo. Por sua vez, a idade da água indica o tempo que uma parcela de água permanece em uma região específica.

Falkenberg (2009) estudou a renovação da água através do parâmetro idade da água e taxa de renovação, para entender os processos de mistura que ocorrem na baía de Paranaguá, e constatou que pode haver grande

variabilidade nas escalas temporais envolvidas no sistema, de acordo com as características das forçantes: maré e descarga fluvial.

Roversi et al. (2016), ao estudar o Sistema Estuarino de Santos, fizeram simulações usando um modelo de transporte Euleriano, para calcular a taxa de renovação das águas da região, tanto para o período de verão quanto o de inverno, e constataram que as águas localizadas na baía de Santos e na embocadura do canal de Bertioga são mais rapidamente renovadas em relação as regiões mais a montante do estuário, constando que a forçante predominante na renovação é a maré.

Para Marsooli et al. (2018), a taxa de renovação é resultante das forçantes, variando com a assimetria entre os períodos de enchentes e vazantes, com o vento, que influencia na renovação da água por conta da alteração na circulação que as ondas de gravidade induzidas pela forçante podem causar no transporte de massas de água, e com fluxo fluvial, provocam variações de salinidade. Marsooli et al. (2018) realizaram simulações na baía da Jamaica, localizada na cidade de Nova Iorque, e concluíram que o pequeno aumento da velocidade dos ventos, no verão, causou uma pequena diminuição na renovação das águas estuarinas, enquanto o aumento da descarga de água doce aumentou significativamente a renovação das águas do estuário.

Zhang et al. (2010), ao verificarem as variações espaciais e temporais que as vazões fluvial e vento geram sobre a taxa de renovação e a idade da água para a região de Nova Iorque indicaram que, o conhecimento destas escalas temporais de transporte, são importantes para o entendimento dos processos de mistura, e que a taxa de renovação e idade da água são dependentes das condições ambientais, como marés, vazão fluvial e vento.

Dalazen (2017) estudou a circulação hidrodinâmica e a renovação de águas na baía de Paranaguá, com a finalidade de compreender as forçantes que atuam no sistema estuarino considerando as diferenças sazonais. Os cenários apresentados por Dalazen (2017) mostraram-se eficazes para apontar a maré e as vazões fluviais como principais forçantes do sistema, além de identificar possíveis áreas de maior estagnação na baía de Paranaguá.

Por fim, pode-se indicar que alterações temporais e a heterogeneidade espacial dos indicadores dos processos de mistura nos estuários, ocorrem, possivelmente, a partir das variações das forçantes hidrodinâmicas. E são indicadores importantes para definir zonas de estagnação e regiões que poderão ocorrer maiores problemas relacionados à qualidade da água em estuário.

## 2.4 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NOS ESTUÁRIOS

O aumento dos níveis de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e outros gases antropogênicos na atmosfera, que provocam o efeito estufa, e as projeções de mudanças climáticas globais decorrentes destas alterações, têm elevado as preocupações no meio científico e político (KACZMAREK, 1996). O problema das mudanças climáticas é altamente debatido em todo o mundo, devido aos seus impactos, conhecidos ou não, e que, se confirmados, trarão implicações diversas para a sociedade e para o meio ambiente.

A expressão mudança climática está associada com modificações nos padrões climáticos, podendo ser apontada pelas variações persistentes em fenômenos e características temporais de longo de período (IPCC, 2013). As condições que influenciam as alterações climáticas podem ser provenientes de múltiplos fatores e situações, de origens antropogênicas ou naturais. No entanto, diversos pesquisadores têm estudado a influência das emissões antropogênicas como causa principal das mudanças climáticas (COOK et al., 2013).

De acordo com o IPCC (2013), foram definidos quatro cenários de projeções futuras, baseados na concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE) na composição atmosférica emitidos nos últimos anos. Esses cenários são denominados como Caminho de Concentração Representativa (Representative Concentration Pathways - RCP) que, em gênese, são rotulados como RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5. Segundo Van Vuuren et al. (2011), os cenários foram selecionados em função da forçante radioativa ( $\text{W/m}^2$ ) e recebem o nome correspondente ao seu nível para projeções para 2100, baseadas nas concentrações de GEE, conforme apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 – Cenários baseados em emissões de GEE do IPCC com a descrição de acordo com a forçante radioativa.

Cenários	Descrição
RCP 8.5	Cenário de alta emissão de GEE, no qual a forçante radiativa atinge $8,5 \text{ W.m}^{-2}$ ( $\sim 1370 \text{ ppm de CO}_2$ ) em 2100.
RCP 6	Cenário de emissão intermediária de GEE, no qual a forçante radiativa se estabiliza em valores próximos de $6,0 \text{ W.m}^{-2}$ ( $\sim 850 \text{ ppm de CO}_2$ ) após 2100.
RCP 4.5	Cenário de emissão intermediária de GEE, no qual a forçante radiativa se estabiliza em valores próximos de $4,5 \text{ W.m}^{-2}$ ( $\sim 650 \text{ ppm de CO}_2$ ) após 2100.
RCP 2.6	Cenário de mitigação rigorosa da emissão de GEE, no qual a forçante radiativa atinge um pico de $3 \text{ W.m}^{-2}$ ( $\sim 490 \text{ ppm de CO}_2$ ) antes de 2100 e então decai para valores em torno de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ em 2100.

FONTE: Van Vuuren et al. (2011) apud Verçosa (2019)

A partir das projeções realizadas pelo IPCC (2013) para uma conjuntura alarmante (RCP 8.5), a temperatura média na superfície da Terra pode sofrer um aumento de  $4,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  até o ano de 2100; cenário que foi estipulado com base na hipótese de que os GEE's continuarão se elevando na mesma proporção em que as taxas atuais têm crescido.

Além do aumento da temperatura global, existem outros efeitos que gerarão impactos, com graves consequências para a sociedade e ao meio ambiente, incluindo a elevação do Nível Médio do Mar (NMM), alteração do regime hidrológico, modificando a distribuição e o volume das precipitações e, conseqüentemente, alterando o balanço hídrico e a descarga fluvial, além das projeções do aumento da frequência de eventos climáticos severos (tempestades, secas, entre outros).

Dentre os efeitos esperados, a elevação do nível do mar pode apresentar graves consequências que incluem inundações das regiões urbanas costeiras, maior extensão da mancha de inundação sobre o interior das planícies costeiras, e maior intrusão salina em águas subterrâneas (NICHOLS; CAZANAVE, 2010;

HU; DESER, 2013; YIN et al., 2017; BARNED et al., 2019 *apud* VERÇOSA, 2019).

Os dados com relação ao aumento do NMM mostram que, as taxas de variações estão continuamente maiores, indicando que já houve uma elevação do final do século 19 para o início do século 20 (PRANDLE et al., 2015). As projeções do IPCC para o aumento do NMM global variando entre 0,45 e 0,82 cm até 2100, para o cenário RCP 8.5, além do aumento da temperatura de superfície. Os cenários apresentados pelo IPCC e as variações do NMM e da temperatura global na superfície estão relacionados na Tabela 2.

TABELA 2 – Variação global da temperatura média da superfície da terra e da elevação do nível médio do mar (média e intervalo de variação) para os cenários futuros projetados pelo IPCC.

		2046 - 2065		2081-2100	
		Média	Intervalo	Média	Intervalo
Média Global das Mudanças da Temperatura da Superfície (°C)	Cenários				
	RCP 2.5	1.0	0.4 a 1.6	1.0	0.3 a 1.7
	RCP 4.5	1.4	0.9 a 2.0	1.8	1.1 a 2.6
	RCP 6.0	1.3	0.8 a 1.8	2.2	1.4 a 3.1
	RCP 8.5	2.0	1.4 a 2.6	3.7	2.6 a 4.8
Cenários		Média	Intervalo	Média	Intervalo
Média Global da Elevação do Nível Médio do Mar (m)	RCP 2.5	0.24	0.17 a 0.32	0.40	0.26 a 0.55
	RCP 4.5	0.26	0.19 a 0.33	0.47	0.32 a 0.63
	RCP 6.0	0.25	0.18 a 0.32	0.48	0.33 a 0.63
	RCP 8.5	0.30	0.22 a 0.38	0.63	0.45 a 0.82

FONTE: Próprio. Adaptado: IPCC (2013)

A partir do conhecimento dos impactos e alterações que as projeções e cenários futuros preveem, é sabido que os estuários sofreram consequências devido às modificações climáticas. Yang et al. (2015), a partir do uso de um modelo hidrológico e de um modelo hidrodinâmico aplicado ao estuário do rio Snohomish, em Washington nos Estados Unidos, estudaram os impactos resultantes das alterações climáticas projetadas para o futuro, investigando as respostas da circulação estuarina mediante as modificações do regime de precipitação, que influenciam diretamente no aporte fluvial, e o aumento do nível do mar. Encontram variações na circulação hidrodinâmica, incluindo modificações da intrusão salina, alterações de profundidade do estuário e da área de inundação.

Com o objetivo de estudar as variações climáticas a partir de modelos estatísticos e registros de salinidade, Ross et al. (2015), ao examinarem os níveis de intrusão salina no estuário de Delaware, nos Estados Unidos, encontraram correlações positivas com o aumento do nível do mar e, utilizando um modelo hidrodinâmico, constataram que as variações dos ventos influenciam consistentemente nos processos de mistura, e no transporte entre o estuário e o oceano. Mostraram também que alterações climáticas não influenciam diretamente a topografia de fundo. Porém, devido aos processos de erosão costeira e mudanças de velocidades dos fluxos de vazante e enchente, modifica-se o transporte de sedimentos, podendo levar a alterações batimétricas.

Prandle et al. (2015) investigaram como os estuários, que têm a maré como principal forçante irão se adaptar às consequências das mudanças climáticas, tais como a elevação do nível médio do mar e alterações nos fluxos dos rios. Os autores analisaram possíveis impactos que podem ocorrer em 96 estuários na região da Inglaterra e no País de Gales. Os efeitos resultantes da elevação de 1 metro do NMM foram pequenos com relação ao processo de mistura vertical; no entanto, para estuários rasos essa modificação gerou impactos significativos. A intrusão salina apresentou um aumento em torno de 7% para estuários profundos e 25% para estuários rasos.

Polli et al. (2021), analisaram os impactos hidrodinâmicos a partir de alterações projetadas pelo IPCC para o ano de 2050, testando alterações no aporte fluvial e no regime de ventos para o Complexo Estuarino de Paranaguá; os resultados mostraram amplificações nos harmônicos diurnos para os cenários futuros e, para os constituintes semi-diurnos, apresentaram tanto amplificações quanto amortecimento, de acordo com a estação analisada dentro do complexo.

Além das modificações relacionadas aos processos de mistura e na circulação hidrodinâmica, Chini et al. (2010) indicam que as ondas incidentes na costa, quando estimadas para cenários futuros de mudanças climáticas, alteram os fluxos de sedimentos, podendo assim gerar alterações no relevo de fundo do estuário. Estas modificações de batimetria podem provocar alterações nas velocidades das correntes.



## 2.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Os modelos podem representar processos meteorológicos e climáticos, hidrológicos, hidráulicos, hidrodinâmicos, processos de transporte, econômicos e aspectos operacionais. Considerando que corpos hídricos naturais possuem uma dinâmica complexa, a utilização da modelagem computacional é indispensável, pois modelos bem calibrados conseguem transcrever um sistema real a partir de equações matemáticas de base física e/ou empíricas, buscando realizar previsões de eventos que ocorrem nesse sistema, podem auxiliar nos diagnósticos e prognósticos ambientais, mapeando áreas de riscos, de vulnerabilidade, entre outros.

Os modelos hidrológicos, meteorológicos e hidrodinâmicos são fundamentais para realizar projeções relacionadas às mudanças climáticas. Bilskie et al. (2016) utilizaram modelos hidrodinâmicos para simular a propagação de maré astronômica e prever efeitos do aumento do nível do mar no Golfo do México, em condições presentes e futuras (2050 e 2100), em que identificaram alterações na hidrodinâmica.

Ao estudarem as implicações provocadas pelo aumento do nível médio do mar relacionadas às diferenças de salinidade e área de inundação no estuarino Goraí localizado no Bangladesh, Bhuiyan & Dutta (2011), constataram, a partir da aplicação de um modelo hidrodinâmico, que devido ao aumento do nível médio do mar, a salinidade no rio aumentou, produzindo uma variação de 0,9 ppt em 80 km a montante da foz do rio.

Sendo assim, é possível afirmar que modelos podem ser utilizados tanto para gerar previsões relacionadas às mudanças climáticas, assim como verificar os impactos relacionados aos cenários previstos das alterações climáticas.

Existem diversas ferramentas computacionais de modelagem ambiental, tais como o Delft3D (WL – Delft Hydraulics, 2021), MOHID (BRAUNSCHWEIG e FERNANDEZ, 2010), HEC-HAS (USACE-HEC, 2016), SisBAHIA®, entre outros, que são capazes de realizar modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte para cenários de mudanças climáticas.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do SisBAHIA<sup>®</sup>, devido ser um software livre, desenvolvido no Brasil e com amplas aplicações em projetos e pesquisas realizadas pela Fundação Coppetec e outras instituições brasileiras, inclusive para o desenvolvimento do Plano de adaptação da cidade do Rio de Janeiro para as Mudanças Climáticas (Fundação Coppetec, 2015). A existência de outros trabalhos na região da baía da Babitonga, como o relatório do projeto Baías do Brasil (2018) e Martins (2011), também, facilitaram na escolha desta ferramenta.

O SisBAHIA<sup>®</sup> é uma ferramenta computacional que possui diversos módulos e aplicações, como modelo digital do terreno, modelo hidrodinâmico, modelo Euleriano de transporte, modelo Lagrangeano de transporte, modelo de qualidade da água, modelo de transportes de sedimentos coesivos e não coesivos, modelo de geração de ondas e modelo de propagação de ondas, entre outras ferramentas disponíveis (ROSMAN, 2021). E que pode ser utilizado para diversas aplicações como avaliação da hidrodinâmica, previsão e ciclos de marés, simulação de lançamento de efluentes, simulação de derramamento de petróleo, taxa de renovação de águas, idade da água, entre outros.

Devido à amplitude de ferramentas existentes e da capacidade do software de desenvolver diversos trabalhos e pesquisas, o SisBAHIA<sup>®</sup> atende as necessidades e aplicações impostas neste trabalho.

## 2.6 ESTUDOS NA BAÍA DA BABITONGA

Estudos prévios que enfocaram a circulação hidrodinâmica na região da baía da Babitonga são limitados, podendo ser destacados: Rosman & Cunha (1997) avaliaram os efeitos que intervenções de engenharia poderiam reduzir as inundações no município de Joinville, causadas por marés meteorológicas na baía da Babitonga, incluindo a Lagoa de Saguaçu - SC. Os resultados mostraram que não ocorreram reduções significativas com relação às cotas de preamar em Joinville para nenhuma das possíveis intervenções de engenharia propostos.

Truccolo e Schettini (1999), com o objetivo de caracterizar a maré astronômica local e conhecer a importância dos efeitos da variação batimétrica na propagação da onda de maré no interior da baía da Babitonga, analisaram as constantes harmônicas de maré da Praia da Enseada e do Porto de São Francisco, caracterizando o regime de maré na baía como do tipo misto, predominantemente semidiurno, com desigualdades entre as alturas para as preamares e baixa-mares consecutivas.

Silva (2011) estudou os aspectos morfológicos, meteorológicos e oceanográficos do Canal do Linguado e da baía da Babitonga através de dados coletados em campo e de simulações numéricas para estimar a circulação hidrodinâmica e os processos de erosão e sedimentação, caso o dique hidráulico existente no Canal do Linguado, fosse removido.

Segundo Noenrberg et al. (2020), as regiões internas da baía da Babitonga podem chegar a proporções de até 20% de águas continentais, enquanto a principal forçante que atua no sistema é a maré, controlando principalmente a variabilidade da temperatura, da salinidade e das correntes. Também constatou que a temperatura apresenta variações diárias irregulares associadas ao aquecimento diurno (verão) e resfriamento noturno (verão e inverno). A distribuição da salinidade ao longo do estuário caracteriza um estuário fracamente estratificado com pequenas variações entre marés, quinzenal e sazonal. As velocidades máximas medidas no canal são semelhantes, tanto para a maré de quadratura quanto para a maré de sizígia, independente da sazonalidade. E próximo a foz dos rios, correntes fluem lateralmente em áreas rasas do estuário.

Noenrberg et al. (2020) também cita que a elevação do nível do mar do oceano adjacente aumenta a intrusão de salinidade e o tempo de residência, consequentemente aumentando a salinidade em direção aos rios. Já a resposta do estuário com relação à temperatura é uma reação mais lenta que a da salinidade.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A baía da Babitonga, que pode ser classificada como um complexo estuarino, está localizada no litoral norte de Santa Catarina, Brasil, com uma área aproximada de 160 km<sup>2</sup>, possuindo, atualmente, um canal de livre acesso a região costeira adjacente. Existia, ao sul da baía, outro acesso ao oceano, região conhecida por Canal do Linguado, que foi fechado na década de 30 para a construção da rodovia BR 280 (MAZZER & GONÇALVES, 2011). Segundo Vieira (2015), este complexo possui a maior área de manguezal preservada do estado de Santa Catarina.

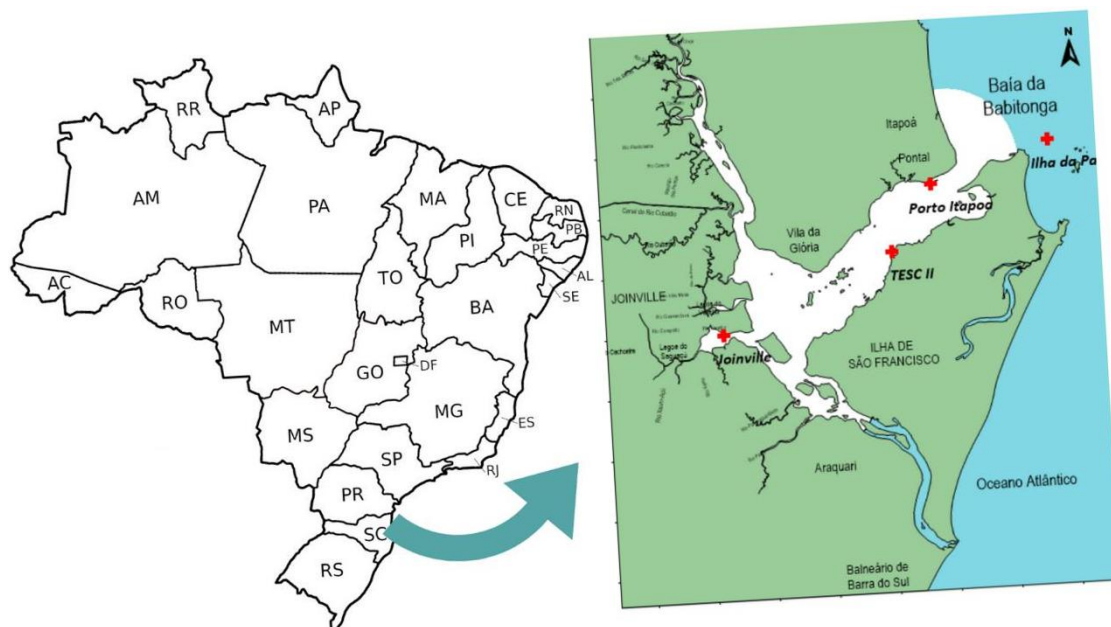
O complexo estuarino da Babitonga, ilustrado na figura 3, possui uma profundidade média de 6 metros, e seu canal de acesso principal tem uma extensão de 3,8 Km de largura, profundidade máxima de 28 metros e orientação NE/SW. Possui dois eixos alongados com sentido SE/NW mais estreitos, com profundidade média de 4 metros e largura máxima de 1,5 Km (VIEIRA, 2015).

A região de estudo está inserida na Planície Quaternária, formada pela sedimentação fluviomarinha. Nessa área plana, que ocupa cerca de 35 km de largura, encontram-se rios meandantes, e são áreas de depósito de areia. Segundo Knie & Fatma (2002), as rochas mais antigas da região são metamórficas arqueanas, e o relevo ao entorno da baía é predominantemente plano, podendo ser suavemente ondulado, embora também haja regiões de serra e montes isolados.

O clima do local onde se situa a baía da Babitonga enquadra-se como temperado Cfa (mesotérmico úmido com verão quente), de acordo com a classificação de Koppen. A temperatura média anual é de 20,3 °C, sendo que nos meses mais frios, é de 16 °C. De acordo com Mello et al. (2015), o índice pluviométrico médio, para planície costeira, é de 2034 mm por ano, com distribuição sazonal. Os maiores índices pluviométricos ocorrem no período entre outubro e março, no verão, com temperaturas mais altas, e com precipitação próxima de 250 mm por mês. Já os menores índices de precipitação

ocorrem no inverno, no período entre abril e setembro, com temperaturas mais amenas e precipitações inferiores a 100 mm por mês.

FIGURA 3 – Localização da baía da Babitonga (SC) com a definição do domínio de modelagem.



Fonte: A autora (2021)

De acordo com Truccolo e Schettini (1999), na região norte do estado de Santa Catarina predomina-se um regime de micro maré (amplitude  $< 2$  m) do tipo misto, prevalecendo marés semi-diurnas com desigualdade diurna, ocorrendo a predominância dos harmônicos M2, seguido pela S2. A amplitude média da maré é de 0,85 m, máxima de 1,28 m para períodos de sizígia, e mínima de 0,27 m durante períodos de quadratura.

Segundo Bucci (2004), os harmônicos M2 e S2 sofrem uma amplificação de aproximadamente 0,37 m e 0,23 m, respectivamente, entre a entrada da baía e a desembocaduras dos rios. Em relação à fase, os harmônicos M2 e S2, ocorrem um atraso de aproximadamente 1,12 h e 1,17 h, respectivamente, entre a entrada da baía e o interior da baía da Babitonga.

A bacia hidrográfica contribuinte da baía da Babitonga, de acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (2017), pertence ao Sistema da Vertente Atlântica, mais especificamente a bacia hidrográfica do rio Cubatão Norte, que é o principal afluente da baía da Babitonga. A bacia

hidrográfica do rio Cubatão Norte possui uma área de 472 km<sup>2</sup>, e uma densidade de drenagem de 1,67 km/km<sup>2</sup>, compreendendo cerca de 792 km de cursos de água. Além do rio Cubatão, existem outros rios contribuintes à baía: Palmital, Cachoeira, Três Voltas, Pirabeiraba, entre outros. Nota-se que a cheia ocorre no verão, nos meses de janeiro e fevereiro, e o período de estiagem ocorre nos meses de inverno; neste trabalho o período de estiagem será considerado entre maio e junho.

A principal forçante que rege a circulação no sistema estuarino da Babitonga é a maré, que controla principalmente as variações de salinidade e as correntes. O estudo também apresenta variações relacionadas as precipitações, verão mais chuvoso e inverno mais seco. Ele é considerado fracamente estratificado com pequenas variações sazonais e em zonas entre marés (NOENRBERG et al., 2020). Ao analisar a estratificação do estuário com base nos resultados medidos de temperatura e salinidade, Noenrberg et al. (2020) constatou que as diferenças sazonais no Canal do Palmital são pequenas, apesar de considerar que há a possibilidade de o volume de água doce ter sido advectado superficialmente, aumentando a estratificação vertical. Entretanto, Schettini e Carvalho (2010) determinaram um padrão verticalmente homogêneo em um afluente do Canal Palmital em condições de baixa precipitação, com a maré como o principal mecanismo regulador da variabilidade da salinidade.

Noenrberg et al. (2020) também constatou que durante os eventos meteorológicos, como entrada de uma frente fria, o estuário apresentou maiores estratificações e variabilidades verticais relacionadas a temperatura e salinidade. Essas variações geradas por este evento meteorológico foram mais relevantes que as geradas pela sazonalidade no estuário. Também apresentou que as variações entre as marés de quadratura e de sizígia geram diferenças de estratificação no estuário.

### 3.2 SISBAHIA® <sup>1</sup>

O SisBaHiA®<sup>®</sup> é um conjunto de modelos computacionais para corpos d'água naturais desenvolvido pela área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, que será utilizado para a modelagem da circulação hidrodinâmica e no cálculo dos indicadores de mistura. O SisBaHiA®<sup>®</sup> utiliza o método dos elementos finitos na discretização espacial, e o método das diferenças finitas na discretização temporal.

As simulações para calibração e validação foram realizadas utilizando o modelo hidrodinâmico bidimensional e o modelo de transporte de calor do SisBaHiA®. O modelo de transporte de calor usa uma abordagem Euleriana, a mesma grade espacial aplicada para o modelo hidrodinâmico e permite o uso de diferentes comprimentos de intervalos de tempo nas análises. A vantagem do acoplamento os dois modelos aparecem na determinação das velocidades, dos níveis e dos coeficientes de turbulência, o que foi feito anteriormente no modelo hidrodinâmico, que pode ser usado diretamente no modelo de transporte de calor.

No cálculo da taxa de renovação é usado o modelo Euleriano de transporte para um constituinte conservativo. Adota-se, no instante inicial, que a água é considerada 0% renovada, e na medida em que “novas águas” entram no domínio do modelo, e que as massas de águas se misturaram no sistema, elas se renovam progressivamente. A água será considerada 100% renovada quando a água inicial passar pelo processo acima descrito e se renove por completo. Assim, para o resultado de Taxa de Renovação, um local com índice de 50% significa que, no momento analisado, 50% das águas daquele local entraram no sistema depois do instante inicial analisado, em outras palavras, 50% é água nova.

A idade da água, por sua vez, trata de estimar o tempo de decaimento de uma substância marcadora de idade presente na água. A determinação da idade da água se dá através da combinação entre um traçador conservativo, e um

---

<sup>1</sup> Esta seção adapta e reproduz textos contidos na Referência Técnica do SisBaHiA®.

traçador não conservativo (com decaimento de primeira ordem), tal qual este último serve como um contador de tempo após ser lançado simultaneamente com o primeiro. A concentração inicial da substância ( $C_0$ ) considera todo o volume de água como sendo homogêneo. As reações cinéticas de decaimento são de primeira ordem, com taxa constante e podem apresentar ganhos ou perdas de massa, dadas por:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

onde  $k$  é a taxa de decaimento ( $T^{-1}$ ). A solução analítica da equação (1) é dada por:

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

É possível escrever:

$$t = \frac{-\ln(C/C_0)}{k} \quad (3)$$

Para analisar o tempo requerido para o decaimento de 90% da concentração de uma substância ( $T_{90}$ ), teremos:

$$T_{90} = \frac{-\ln(0,1)}{k} \quad (4)$$

Desta forma, adotando um  $T_{90}$  elevado, após o tempo de estabilização do modelo, pode-se aferir a concentração  $C$  em diversas regiões do domínio, possibilitando calcular a idade da água de uma determinada região.

### 3.3 DADOS

Inicialmente, foi realizada a calibração e validação do modelo hidrodinâmico e, posteriormente, a calibração e a validação do modelo de transporte de calor. Um conjunto de dados medidos entre 12 de janeiro e 12 março de 2019 foi usado para calibrar os dois modelos; outro conjunto de dados medidos entre maio e junho de 2019 foi usado para validar os modelos.

Na modelagem dos parâmetros de qualidade de água, foi analisada a variação da temperatura. Considera-se que este parâmetro é significativo para



calibrar e validar o modelo de transporte; os coeficientes definidos nesta modelagem foram usados no cálculo da idade da água e da taxa de renovação. Para a calibração e validação do modelo de transporte, foi utilizada a mesma malha em elementos finitos, e importados os valores das componentes de velocidades do modelo hidrodinâmico. Na fronteira aberta foram prescritas as condições de contorno para a condição de afluxo, extraídas do *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM), que é um modelo de circulação global dos oceanos. Os valores de radiação solar foram estimados através do SisBaHiA®, que calcula, a partir, de um modelo matemático, os valores de radiação solar para a região.

A metodologia empregada para o cálculo de radiação, existente no SisBaHiA®, consiste nas equações propostas por Martin & McCutcheon (1999), que consideram nos cálculos a variação de parâmetros geográficos, sazonais e meteorológicos. Os dois primeiros parâmetros são considerados pela latitude do local de estudo e pelas estações do ano, que influenciam na incidência dos raios solares. Já o terceiro parâmetro é representado pela condição de cobertura de nuvem, que foi considerada permanente, devido às inconsistências dos dados existentes das estações meteorológicas das regiões próxima da baía da Babitonga.

Ainda, a temperatura da água dos rios foi considerada permanente durante todo o período de simulação, com valores de 25°C para o período de verão e 23°C para o inverno. Como condição inicial foi usada a temperatura de 30°C para o verão e 23°C para o inverno em todo o domínio de modelagem (SCHETTINI & CARVALHO, 2010)

### **3.3.1 Domínio de Modelagem**

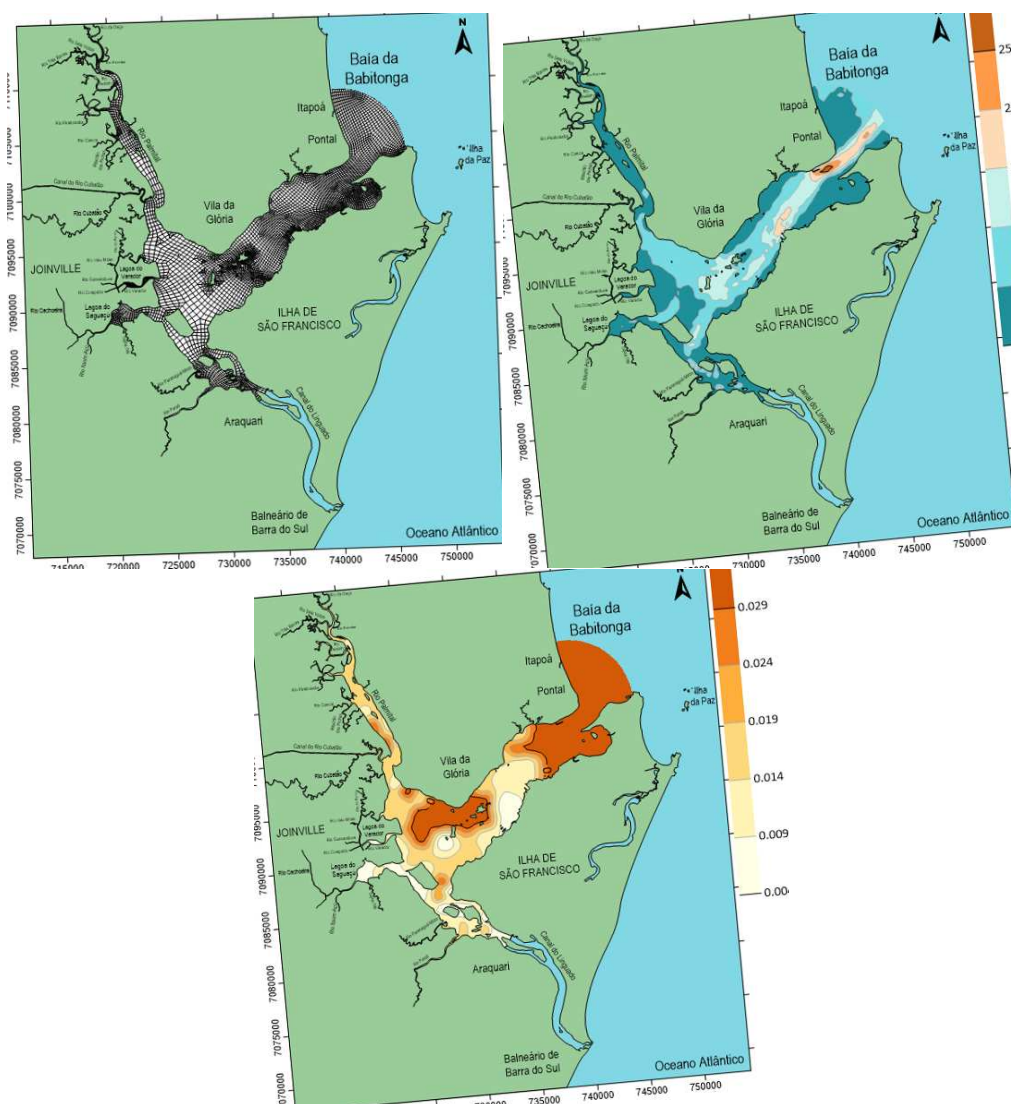
O modelo geométrico (domínio da modelagem e a amplitude da rugosidade de fundo) utilizado neste trabalho foi obtido através do projeto Baías do Brasil, desenvolvido pela COPPE- UFRJ e disponível em [www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br](http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br). O domínio da modelagem possui contornos de terra, mar e de ilhas, incluindo os rios que compõe a bacia hidrográfica e uma porção da região costeira adjacente. A figura 4a, ilustra que a malha,

discretizada usando elementos finitos, com 1455 elementos no total tendo 6.669 nós de cálculos.

A batimetria do modelo (figura 4b) foi obtida utilizando as cartas náuticas (CN) nº: 1800 e 1804 – Porto de São Francisco do Sul da DHN e de estudos realizados na região com a colaboração da EPAGRI. Os dados de batimetria foram reunidos, organizados, e, posteriormente, interpolados na malha de discretização.

A definição do coeficiente de atrito do fundo do SisBaHiA® é feito por meio do coeficiente de Chèzy, que depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo que, por sua vez, é definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo. Este parâmetro pode funcionar como um parâmetro de calibração; se a amplitude de rugosidade equivalente do fundo é muito alta, a onda de maré sofrerá mais dissipação, em comparação às condições com menores valores deste parâmetro. Os valores de amplitude de rugosidade do fundo ( $\xi$ ) para a baía da Babitonga foram retirados de Vieira et al. (2008). É possível observar na baía a predominância de areias finas e médias ( $\xi < 0.030$  m); observa-se, ainda, bancos de areia predominantemente grossa ( $\xi > 0.035$  m) na entrada da baía e em uma região interna da baía, local adjacente à Ilha Grande; e próxima a foz dos rios predomina argilas ( $\xi = 0.01$  m).

FIGURA 4- a) Domínio da modelagem e malha de discretização. b) Batimetria da baía da Babitonga, em metros e c) Amplitude da rugosidade de fundo, em metros.



Fonte: Autora 2021

### 3.3.2 Maré

Os dados de maré usados na fronteira aberta para as simulações hidrodinâmicas foram medidos na Estação Marégrafa da Ilha da Paz (a localização da estação pode ser observada na figura 3) disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI, 2020). Na Estação Marégrafa da Ilha da Paz são usados sensores piezelétricos e sensores de nível tipo radar, painéis solares e bateria, um datalogger para armazenamentos de dados, modem GPRS para transmissão, e finalmente, um servidor de recebimento e armazenamento dos dados. As

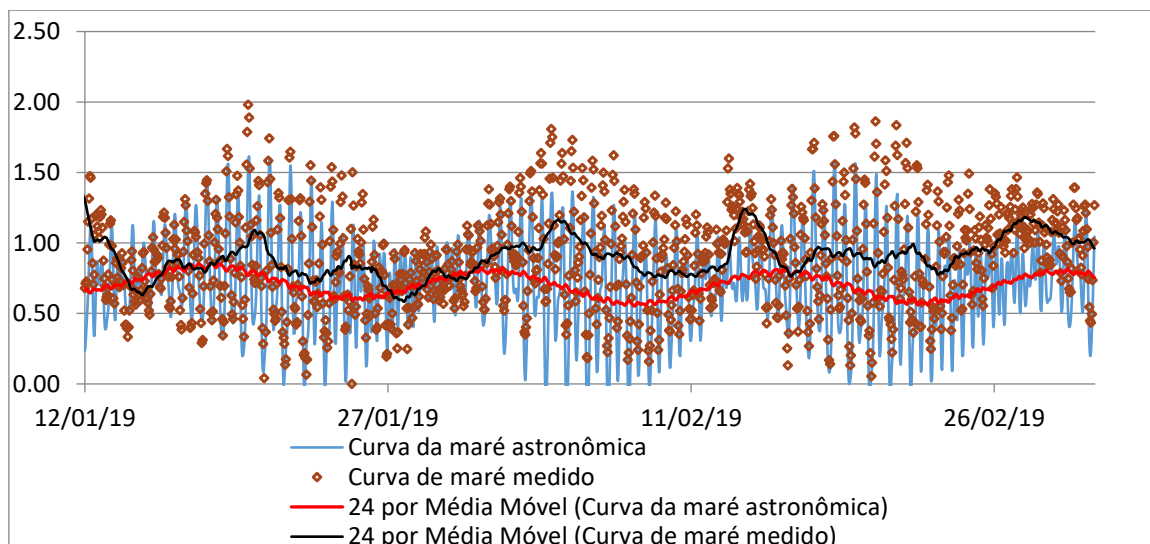
medições coletadas pelos sensores são realizadas de maneira automática em intervalos de 5 minutos.

Devido à presença de uma grande falha nos dados nos 11 primeiros dias de 2019, os dados são apresentados a partir do dia 12 de janeiro de 2019. As outras falhas são pontuais e foram preenchidas usando os valores de maré astronômica.

É possível observar um regime de maré semi-diurno, com uma amplitude máxima de 1.78 m, e preamar máxima de sizígia de 1.98 m. Podem-se observar condições de maré meteorológica típica de entrada de frente fria: entre os dias 19/01/2019 e 21/01/2019, o nível médio do mar se elevou em 25 cm, entre os dias 03/02/2019 e 06/02/2019 houve um aumento de 33 cm do nível médio do mar e entre os dias 11/02/2019 e 15/02/2019, é possível observar uma elevação de 48 cm do NMM.

Comparando as médias móveis para um período de 24 horas, dos dados das curvas de maré medida e astronômica, é possível notar a presença dos eventos meteorológicos citados explicitamente, sendo observadas as diferenças entre os valores esperados da posição da superfície livre considerando apenas a maré astronômica em comparação com os valores medidos no marégrafo da Ilha da Paz.

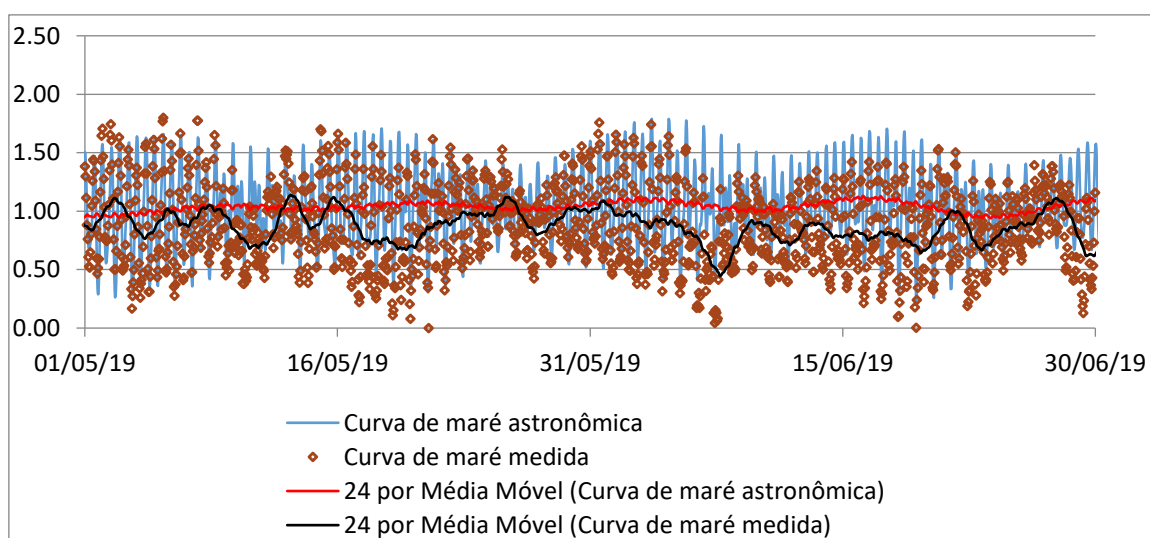
FIGURA 5 – Curvas de maré medida na Estação da Ilha da Paz, a maré astronômica e as médias móveis para um período de 24 horas da maré astronômica (vermelho) e medida (preto) entre 12/01/2019 a 12/03/2019.



Fonte: A autora. 2021

Para o período entre maio e junho de 2019, a curva da maré medida na ilha da Paz é apresentada na figura 6. Nota-se que a amplitude máxima com 1,60 m e a altura maré máxima é de 1,80 m. É possível perceber que eventos meteorológicos durante todo o período de inverno, nota-se uma redução do nível do mar com cerca de 0,30 m entre os dias 10/06/2019 e 12/06/2019.

FIGURA 6 - Curva da maré medida na Estação da Ilha da Paz e a maré astronômica para o período entre 12/01/2019 a 12/03/2019. Em vermelho e preto pode-se observar as médias móveis para um período de 24 horas da maré astronômica e da curva de maré medida na Ilha da paz



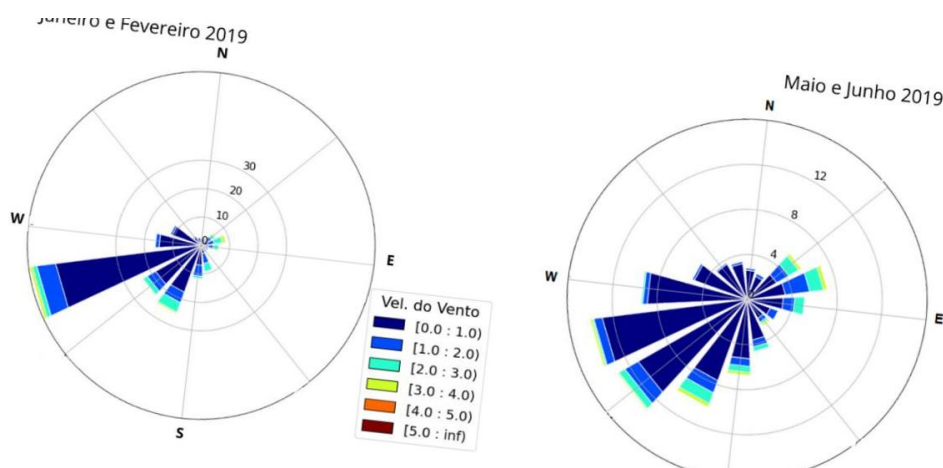
Fonte: A autora. 2021

### 3.3.3 Vento

Os valores de módulo da velocidade e direção do vento, utilizados para as simulações hidrodinâmicas de calibração e validação, foram obtidos a partir dos dados medidos na estação de monitoramento de Itapoá- SC, e disponibilizados pelo INMET para o período de verão, entre janeiro e fevereiro de 2019, e para o período de inverno, maio e junho de 2019. A intensidade e direção dos ventos foram medidas a cada hora; a velocidade média no verão é 0,64 m/s, com valores máximos de 6,5 m/s e no inverno, a média é de 0,44 m/s, com máximo de 5,1 m/s. A direção predominante é WSW (Oeste-sudoeste) para o período de verão e as direções WSW e SW (Sudoeste) para o de inverno.

Nas simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas foram usados os dados de vento de 2019. Polli et al. (2021) mostraram que as estimativas de padrões de vento para cenários de mudanças climáticas realizados no complexo estuarino de Paranaguá, usando o modelo WRF, mostraram que o conjunto de dados de vento não apresenta diferenças significativas na média, mediana e percentis ao comparar os diferentes cenários de mudanças climáticas com os padrões atuais. No entanto, apresentaram diferenças na velocidade máxima do vento, com valores maiores para o cenário RCP 8.5 e valores menores para o cenário RCP 4.5. As maiores diferenças foram observadas durante o verão. Durante o inverno, essas diferenças são menores e, quando observadas, há uma atenuação da mediana e dos percentis para os cenários futuros. Nenhuma mudança significativa na direção do vento foi observada para os cenários avaliados. Considerando que o complexo estuarino de Paranaguá apresenta características climáticas similares a região da baía da Babitonga, é razoável que, nas simulações dos cenários futuros de mudanças climáticas, foram usados os dados de vento de 2019.

FIGURA 7 – Rosa dos ventos para o período de verão de 2019 e inverno de 2019 na estação de Itapoá- SC.



FONTE: INMET. 2019

### 3.3.4 Vazões Fluviais

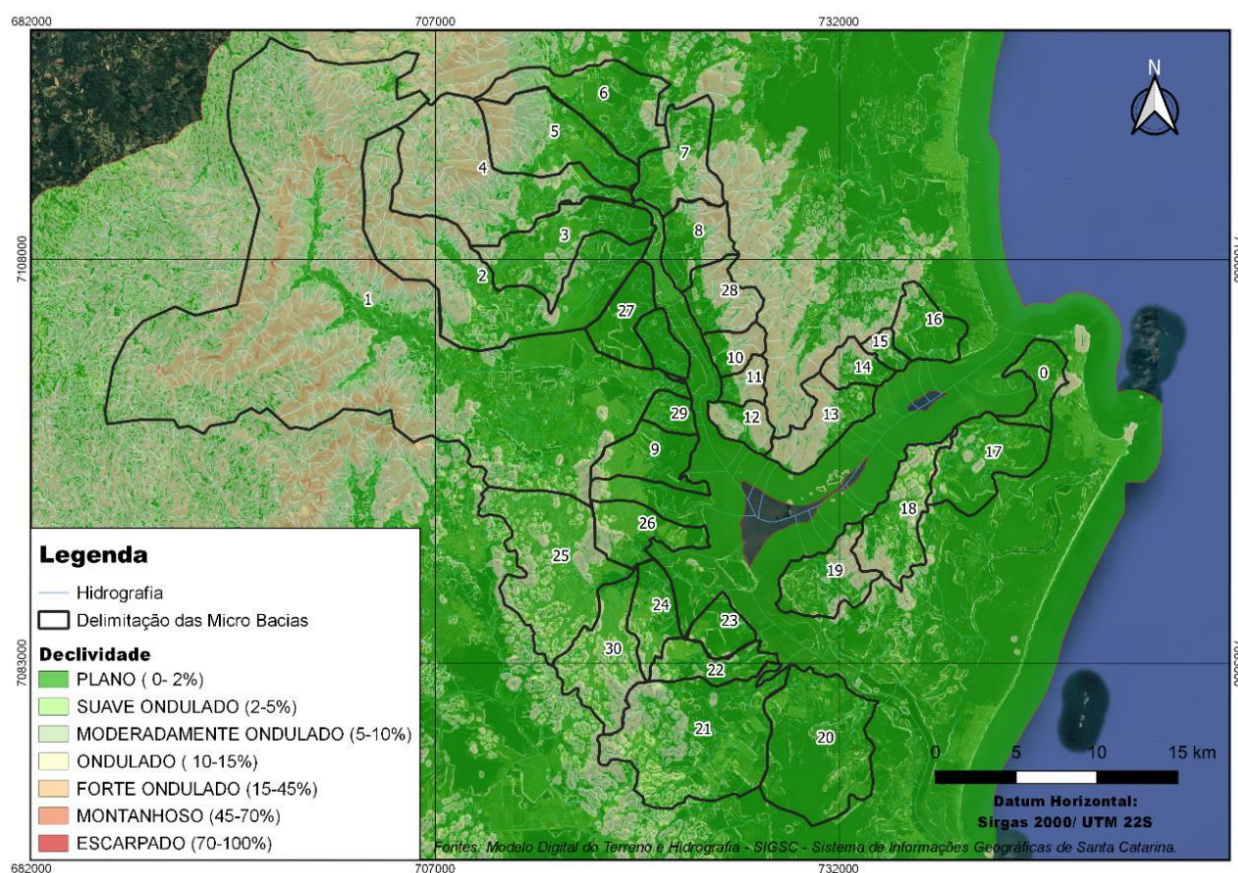
Os dados de vazões foram obtidos usando o método racional modificado, que forneceu vazões mensais para os rios contribuintes a baía da Babitonga. Este método foi usado devido à escassez de dados de vazões na região. As vazões médias estimadas dos afluentes da baía da Babitonga foram verificadas, comparando os valores obtidos pelo método racional modificado, como os valores encontrados em alguns estudos disponíveis na literatura, para os rios Cubatão, Cachoeira e Palmital.

Para o cálculo das vazões mensais, a bacia hidrográfica contribuinte da baía da Babitonga foi separada em microbacias. As microbacias hidrográficas pertencentes à bacia de contribuição da baía da Babitonga foram delimitadas utilizando o *software* Qgis, juntamente com a extensão GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*), que permite, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), delimitar bacias hidrográficas.

As 30 microbacias hidrográficas geradas são pertencentes ao sistema vertente atlântica, fazendo parte da região hidrográfica denominada pelo estado de Santa Catarina como Baixada Norte, majoritariamente pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Cubatão Norte. As microbacias são apresentadas na figura 8. Na Tabela 3 são mostradas as áreas, comprimentos e declividades para cada microbacia.



FIGURA 8 – Mapa da subdivisão das microbacias na região da baía da Babitonga.



Fonte: SIGSC. 2019

TABELA 3 – Dados das microbacias na região da baía da Babitonga: área, comprimento e declividade.

id	Nome	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento Axial Bacia (m)	Declividade (m/m)
1	Rio Cubatão	382.68	35	49.50
2	Rio Sambaqui	80.1	26	32.14
3	Rio Cavalinho	32.48	11	11.17
4	Três Barras	63.76	14	15.71
5	Sete Voltas	35.64	7	8.76
6	Braço da Onça	33.49	9	9.46
7	Rio Palmital	24.27	7	7.93
8	Rio dos Barrancos	17.32	5	5.26
9	Do Ferro	18.06	5	5.08
10	Rio Batovi	8.09	3	3.11
11	Corrego do Pinto	6.22	3	3.19
12	Córrego do Saco	9.22	3	3.31
13	Córrego Alvarenga	19.17	2	2.16
14	Arroio Ribeiro	8.63	3	3.31
15	Córrego Barbosa	4.09	3	3.03
16	Córrego Jaguaruna	14.88	4	4.02
17	Rio Monte Tigre	28.67	8	8.01



id	Nome	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento Axial Bacia (m)	Declividade (m/m)
18	Rio Morro da Palha	25.43	5	5.08
19	Ribeirão Jacutinga	20.56	5	5.05
20	Rio Areias Grandes	52	4	4.00
21	Rio Parati	66.96	11	11.08
22	Paranaguá Mirim	14.4	7	7.01
23	Corrégo Pernambuco	9.94	2	2.00
24	Rio Velho	14.7	6	6.02
25	Rio Cachoeira	53.95	12	12.12
26	Varador	17.92	3	3.31
27	Ribeirão das Pedras	15.82	4	4.00
28	Rio da Catarina	15.48	3	3.11
29	Cubatãozinho	6.53	3	3.00
30	Itaim- Açu	29.13	12	12.19

Fonte: A autora. 2021

Com os valores das áreas, das declividades, do comprimento axial dos rios e dados de precipitação mensal, mostrados na Tabela 4 (disponibilizado pelo INMET), foi possível calcular, através do método racional modificado, as vazões mensais para cada microbacia. O método racional modificado diferencia-se do método racional por adicionar um coeficiente de retardo (  $\phi$  ) que é definido a partir da área da bacia.

TABELA 4 – Precipitações mensais entre os anos de 2010 e 2020 na estação de Itapoá- SC..

Mês	Precipitação (mm)
Janeiro	363
Fevereiro	288
Março	275
Abril	137
Maio	95
Junho	129
Julho	128
Agosto	115
Setembro	168
Outubro	189
Novembro	247
Dezembro	209

FONTE: INMET. 2020

Os valores estimados de vazão são apresentados na Tabela 5. O maior contribuinte é o rio Cubatão que representa 33,6% do total de água doce que chega ao estuário, seguido pelos rios Sambaqui, Parati e Três Voltas que apresentam, em conjunto, 18,8 %. Estima-se que a soma das vazões mensais dos rios nos meses de verão é de aproximadamente 71 m<sup>3</sup>/s, cerca de 3 (três) vezes maior comparado com o período de inverno, em que a soma das vazões que chegam a baía da Babitonga é de aproximadamente 24 m<sup>3</sup>/s.

TABELA 5 – Vazões médias estimadas para verão e inverno, a partir do modelo racional modificado.

<b>Micro Bacia Hidrográfica</b>	<b>Vazão Média de Verão(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vazão Média de Inverno (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>%</b>
Rio Cubatão	23.65	8.14	33.6
Rio Sambaqui	4.97	1.71	7.1
Rio Cavalinho	2.03	0.7	2.9
Três Barras	3.98	1.37	5.7
Sete Voltas	2.23	0.77	3.2
Braço da Onça	2.09	0.72	3.0
Rio Palmital	1.52	0.52	2.1
Rio dos Barrancos	1.09	0.37	1.5
Do Ferro	1.13	0.39	1.6
Rio Batovi	0.51	0.17	0.7
Corrego do Pinto	0.39	0.13	0.5
Córrego do Saco	0.58	0.2	0.8
Córrego Alvarenga	1.2	0.41	1.7
Arroio Ribeiro	0.54	0.19	0.8
Córrego Barbosa	0.26	0.09	0.4
Córrego Jaguaruna	0.93	0.32	1.3
Rio Monte Tigre	1.79	0.62	2.6
Rio Morro da Palha	1.59	0.55	2.3
Ribeirão Jacutinga	1.29	0.44	1.8
Rio Areias Grandes	3.26	1.12	4.6
Rio Parati	4.18	1.44	6.0
Paranaguá Mirim	0.9	0.31	1.3
Corrégo Pernambuco	0.62	0.21	0.9
Rio Velho	0.92	0.32	1.3
Rio Cachoeira	3.37	1.16	4.8
Varador	1.12	0.39	1.6
Ribeirão das Pedras	0.99	0.34	1.4
Rio da Catarina	0.97	0.33	1.4
Cubatãozinho	0.41	0.14	0.6
Itaim- Açú	1.82	0.63	2.6

Os valores obtidos pelo método racional modificado são similares aos encontrados na literatura, que apresentam estudos específicos para alguns

corpos hídricos. Schettini e Carvalho, 2010, mostram valores de vazões médias similares as apresentadas na tabela 5. Os dados para o período de 1950 até 1995 mostram uma descarga média anual de  $12,4 \text{ m}^3/\text{s}$ , com as maiores descargas em fevereiro,  $18,1 \pm 20,1 \text{ m}^3/\text{s}$ , e as menores em junho,  $9,0 \pm 8,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Valores de medições pontuais apresentadas pelo Comitê de Bacias do Rio Cubatão e do Rio Cachoeira, mostram valores similares aos calculados (CCJ, 2021). Ainda, os valores de vazões utilizados nas simulações hidrodinâmicas disponibilizadas no projeto Baías do Brasil também estão em consonância com os obtidos na tabela 5.

### **3.3.5 Elevação do Nível Médio do Mar**

Os dados apresentados pelo IPCC com relação ao aumento do nível médio do mar indicam valores em escala global, sendo valores médios para elevação do oceano para todo o planeta. Portanto para realizar as projeções em escala regional e mais especificamente para a região da baía da Babitonga, os valores utilizados foram gerados através de projeções utilizadas pelo Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC- Brasil).

O SMC- Brasil é um conjunto de modelos numéricos que, combinados com bases de dados de batimetria, ondas e nível do mar (dados de maré astronômica e meteorológica), propõe-se a estudar problemas nas zonas costeiras. A utilização dessa ferramenta permite estudos temporais de processos costeiros, e a quantificação das variações do litoral, possibilitando a análise de cenários com projeções concretas com relação à elevação do nível médio do mar.

O SMC-Brasil usa os dados de onda, em águas profundas, na região próxima à costa brasileira, para propagar até a região próxima à costa. Para obter os dados de ondas em águas profundas foi desenvolvida, especialmente para o Brasil, uma metodologia em duas etapas. A primeira etapa foi criar séries de estados de mar de longa duração com intervalos de 1 hora, simulando numericamente as condições de ondas globais para um período de 60 anos. Para isto se utilizou uma malha global e uma sub-malha na área do Brasil com resolução de  $1/4$  de grau. No SMC-Brasil foi dado ênfase na zona oceânica adjacente à costa do Brasil, com a batimetria obtida a partir das bases de dados

GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*). As condições meteorológicas são as principais forçantes que produzem as ondas sobre a superfície oceânica; para realizar uma reanálise de ondas é necessário contar com dados atmosféricos globais de qualidade. O SMC usa dados do Projeto *Reanalysis*, coordenado pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) junto com o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) sobre a batimetria global obtida também da base de dados GEBCO. A simulação numérica foi realizada com o modelo *Wave Watch III*. Esta etapa gerou uma base de dados de ondas em águas profundas GOW (Global Ocean Waves) com características globais.<sup>2</sup>

A base de dados GOW foi utilizada como condição de contorno para simulações regionais (DOW). Portanto, na segunda etapa foi realizada uma redução de escala (*downscaling*), gerando uma base de dados com características regionais, usando o modelo *SWAM*, com 1 km de resolução. A batimetria utilizada foi refinada com informações disponíveis nas cartas náuticas brasileiras. Considerando o elevado número de simulações necessárias para realizar esta parte da metodologia, foi empregada uma técnica de classificação para selecionar o número de estados de mar mínimo que abrangesse a variabilidade das ondas em cada uma das malhas utilizadas. Foram realizadas as simulações destes estados de mar e, posteriormente, utilizando uma técnica de interpolação, reconstruídas as séries nos nós das malhas. As séries reconstruídas, geradas nesta etapa da metodologia, são denominadas DOW (*Downscaled Ocean Waves*). Essas duas etapas da metodologia encontram-se implantadas no SMC-Brasil (Dados GOW, as simulações de estados de mar representativas e funções de transferência). Os chamados dados DOW, que contém uma série temporal de ondas, estão disponíveis para realizar estudos na costa do Brasil.

O banco de dados de ondas DOW possui dados de altura significativa ( $H_s$ ), período médio ( $T_m$ ), período de pico ( $T_p$ ), direção de pico ( $\theta_p$ ), direção média

---

<sup>2</sup> Esta seção adapta e reproduz textos contidos no Manual do SMC- Brasil, 2021.

( $\theta$ m), dispersão direcional e espectros de energia para o período de 1948 a 2008 (60 anos) com resolução horária, em uma grade com espaçamento de 1 km (para profundidade variando entre 0 a 20m) e 10 km (para profundidades maiores que 20m). Estes dados foram calibrados e validados para serem aplicados em estudos da dinâmica costeira do Brasil. A calibração foi realizada usando dados de duas boias: a primeira localizada em Tramandaí – RS a 17m de profundidade (29°59'58"S, 50°06'09"O) e a segunda, localizada a 80m de profundidade, fundeada entre os anos de 2001 a 2005, a 35km da costa da Ilha de Santa Catarina (27°42'18"S, 48°8'2,4"O).

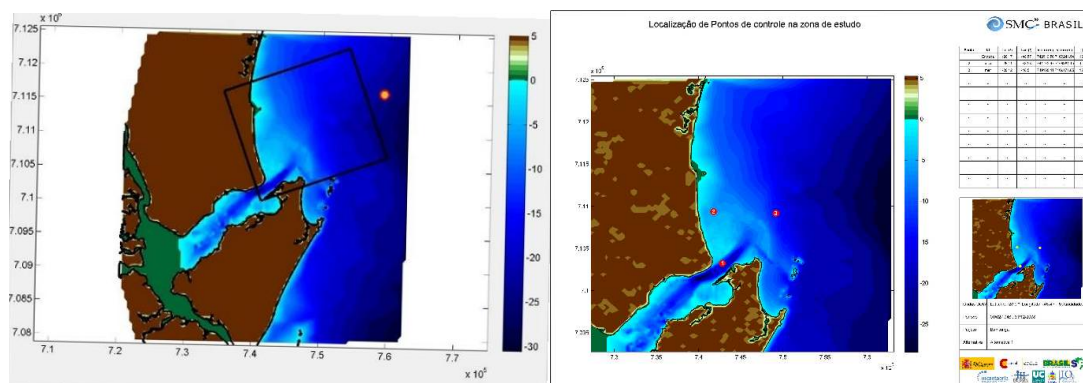
No entanto, para aplicar os dados em uma área de estudo, ainda é necessário transferi-los até a costa, com uma maior resolução espacial. Esta etapa é realizada pelo usuário do SMC-Brasil com o modelo de propagação de ondas OLUCA, que se encontra incorporado ao sistema. O OLUCA é um modelo parabólico de propagação de ondas, que resolve adequadamente todos os processos que as ondas são submetidas ao aproximarem da costa: refração, difração, empinamento e quebra de ondas. O único processo que não é resolvido, devido ao método em que as equações são resolvidas, é a reflexão; o uso não é adequado para estudar os locais onde este fenômeno é importante (por exemplo, docas de portos).

A metodologia para transferir os pontos DOW para pontos na costa é composta por três passos: no primeiro passo, é feita uma seleção de casos a serem propagados, no segundo, são propagados os casos selecionados e no terceiro, é reconstruída a série em um ou vários pontos da praia, denominados pontos objetivos. Nos pontos objetivos ao longo da linha de costa é possível avaliar a direção da energia de onda, transporte de sedimentos e uma série de resultados adicionais que são necessários para entender o funcionamento de uma praia.

#### ▪ **SMC- Brasil aplicado a baía da Babitonga**

A figura 9 mostra a região de interesse, com a definição do domínio pelo SMC-Brasil, e a localização dos pontos de controle usados para definir a influência das ondas de gravidade.

FIGURA 9 - Localização do ponto de onde foram extraídos os dados de onda e o estado do mar do SMC (ponto DOW) e a localização dos três pontos de controle (direita). É possível também observar a batimetria e a malha usada na propagação dos casos.



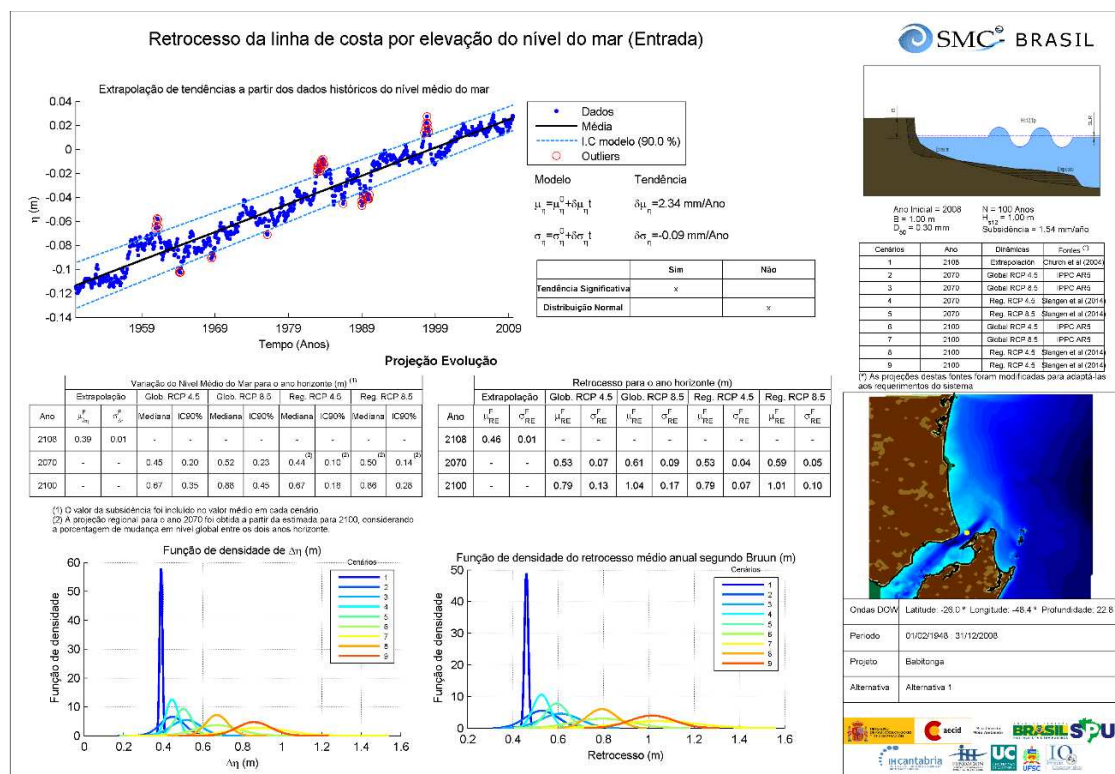
Fonte: A autora. 2021

A partir da caracterização do ponto DOW (Downscaling Ocean Waves), é possível fazer uma análise estatística das características do estado de mar. Neste trabalho são apresentados valores para um período de 20 anos (1988 a 2008). A figura 10 mostra as saídas do SMC-Brasil para o ponto DOW, localizado na Latitude: 26,0 S e Longitude: 48,4 W, com uma profundidade de 22.8 m, utilizadas para caracterizar o clima de ondas na região da Baía da Babitonga.

As ondas obtidas neste ponto são propagadas pelo SMC-Brasil através de uma malha previamente definida (figura 9) até a região próxima e a entrada da baía, definida por três pontos de controle. As projeções de variação de nível médio do mar para cenários de mudanças climáticas obtidas pelo modelo global do SMC-Brasil são mostradas na figura 10 e na Tabela 6, para o ano de 2100. Para o cenário de alta emissão de Gases do Efeito Estufa, no qual a forçante radiativa atinge  $8,5 \text{ w m}^{-2}$ , a mediana da elevação do nível do mar é de 0,88 m, com um intervalo de confiança de 90%, de 0,45 m, e para o modelo regional de 0,86 m, com um intervalo de confiança de 90%, de 0,28 m. Para um cenário intermediário, onde a radiação se estabiliza em  $4,5 \text{ w m}^{-2}$ , observa-se um aumento de 0,67 m do nível médio do mar, tanto com o uso do modelo global quanto o regional, com intervalos de confiança de 90%, de 0,35 m e 0,18, respectivamente. Para as simulações para os cenários futuros serão utilizados

os valores do modelo regional projetados pelo SMC- Brasil para elevar o nível médio do mar.

FIGURA 10 – Valores de projeção da elevação do nível médio do mar e retrocesso da linha de costa para cenários futuros.



FONTE: SMC – Tools. 2021

TABELA 6 – Mediana da variação do Nível do Médio do Mar e intervalo de confiança (IC90%), em metros, para os anos de 2070 e 2100, considerando diferentes cenários do IPCC.

Ano	Global RCP 4.5		Global RCP 8.5		Regional RCP 4.5		Regional RCP 8.5	
	Mediana	IC90%	Mediana	IC90%	Mediana	IC90%	Mediana	IC90%
2070	0,45	0,20	0,52	0,23	0,44	0,10	0,50	0,14
2100	0,67	0,35	0,88	0,45	0,67	0,18	0,86	0,28

FONTE: SMC – Tools. 2021

### 3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

#### 3.4.1 Dados Medidos

A Epagri realiza medições contínuas da posição da superfície livre para três estações de monitoramento na baía da Babitonga: Porto de Itapoá, Terminal

de Santa Catarina II – São Francisco e Iate Clube de Joinville. A localização das estações pode ser observada na figura 11. Estes dados foram disponibilizados pela Epagri e usados para calibrar e validar o modelo de circulação hidrodinâmico do SisBaHiA®.

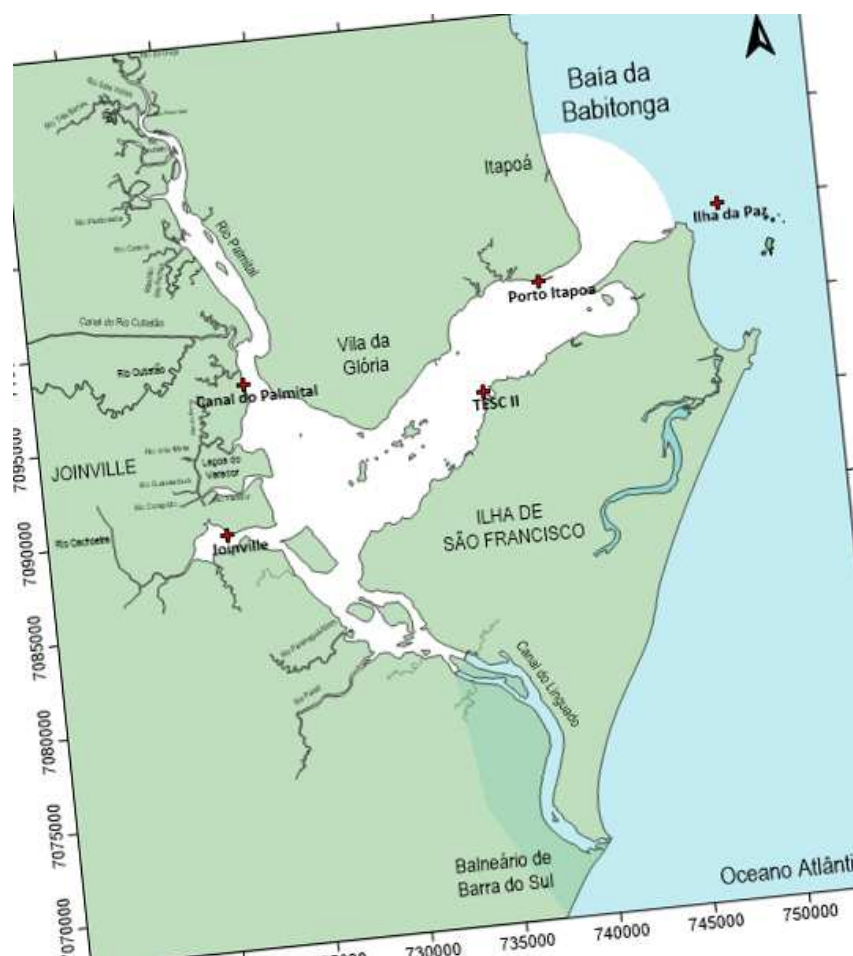
Os dados medidos apresentam poucas falhas. No entanto, na Estação do Iate Clube de Joinville, entre o período de 04/02/2019 às 9:00 à 28/02/2019 às 23:00, ocorreu uma falha importante.

Além dos dados disponibilizados pela Epagri, Noerberg et al. (2020) apresentaram medições no Canal do Palmital durante o período de verão, entre 21 de janeiro de 2019 a 11 de fevereiro de 2019, e durante o período de inverno, entre 19 de junho de 2019 a 24 de julho de 2019. Essas campanhas incluíram medição de correntes, próxima ao fundo, e da temperatura da água, que também foram usadas para a calibração e validação dos modelos hidrodinâmicos e do modelo de transporte de calor.

Os dados foram medidos por Noerberg et al. (2020) a partir da ancoragem do Perfilador de Corrente Doppler (ADCP) a uma profundidade de 5 metros, registrando dados a cada 15 minutos. Os instrumentos foram colocados a aproximadamente 22 km da foz do estuário, no Canal do Palmital. Ao lado do ADCP, com uma sonda JFE *Advantech Infinity* – CT, foram registrados os valores de temperatura e condutividade.



FIGURA 11 – Mapa da baía da Babitonga, com a localização das estações marégrafas da Ilha da Paz, porto de Itapoá, Terminal de Santa Catarina II (TESC II) e late Clube de Joinville, onde foram medidos valores da posição da superfície livre pela Epagri, e a estação no Canal do Palmital.



Fonte: A autora. 2021

A correta medição dos valores das variáveis ambientais, como por exemplo, nível d'água e correntes, é um pressuposto necessário para que os dados coletados possam ser usados para calibrar e validar os modelos. No entanto, se observa que algumas medições apresentam ruídos, sendo a sua validade comprometida pela presença deste tipo de anomalia. Neste caso, é possível eliminar os sinais de alta frequência e manter os sinais de interesse, concentrados em regiões de baixa frequência.

A análise espectral pode ser usada para “filtrar” séries temporais e, usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), obter séries sem ruídos e, assim, retirar oscilações ou ruídos indesejáveis. Os ruídos atuam em determinadas bandas de frequência, sendo assim, é conveniente manipular as

informações no domínio da frequência. A FFT fornece uma representação da frequência das amplitudes de um sinal ou densidade espectral de potência, possibilitando a identificação das bandas de frequência ruidosas e sua eliminação. Por meio da transformada inversa, recupera-se o sinal em seu domínio original. A vantagem em se utilizar FFT é saber exatamente quais as frequências de cortes são as mais indicadas, possibilitando uma análise mais crítica dos sinais obtidos. Usando um filtro passa-baixa, zera-se os valores da transformada de Fourier a partir de um determinado valor. Em seguida, é realizada a transformada inversa, obtendo assim a função no domínio do tempo filtrada.

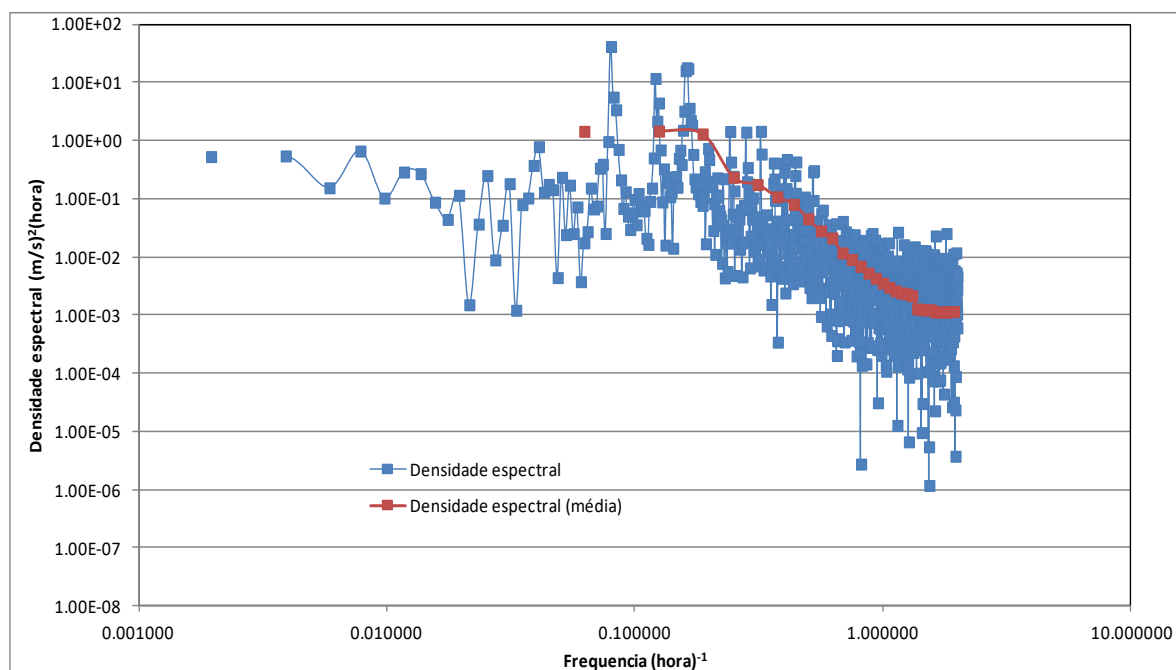
O processo de filtragem ocorre com a escolha da frequência que deve ser eliminada. Quanto menor a frequência, maior a amplitude da série filtrada e, conseqüentemente, maior o resíduo. Se a frequência for muito pequena, ou seja, se o filtro retirar muitas frequências que não são explicadas, o filtro será mais exigente, mostrando uma diferença entre as componentes aleatórias e periódicas. Pode-se, através do processo de filtragem, dividir a série temporal em duas: a série filtrada, que representa a parcela periódica, e a série dos resíduos, que representa as componentes aleatórias. Esta separação permite determinar a relação entre os componentes aleatórios e periódicos, além de caracterizar os pulsos em relação as componentes periódicas e aleatórias.

Os dados medidos de corrente (módulo e direção) usados para calibrar e validar correspondem as medições realizadas no canal do Palmital. Foram feitas medições no verão, entre 24/01/2019 e 11/02/2019, com intervalo de 15 minutos, totalizando 1708 dados. No inverno, foram feitas medições entre 18/06/2019 e 24/07/2019, com intervalo de 15 minutos, totalizando 3443 dados. As séries foram divididas em duas, considerando que o tamanho da série deve, obrigatoriamente, ser uma potência de base 2: com 1024 dados cada série no verão e com 2048 e 1024 dados cada série, no inverno.

Nas medições de correntes foi usado um ADCP ancorado a uma profundidade de 5 metros. As séries temporais das componentes  $U$  (componente Leste-Oeste) e  $V$  (componente Norte-Sul) foram submetidas à análise espectral. A figura 12 mostra as densidades espectrais e média de 32 densidades

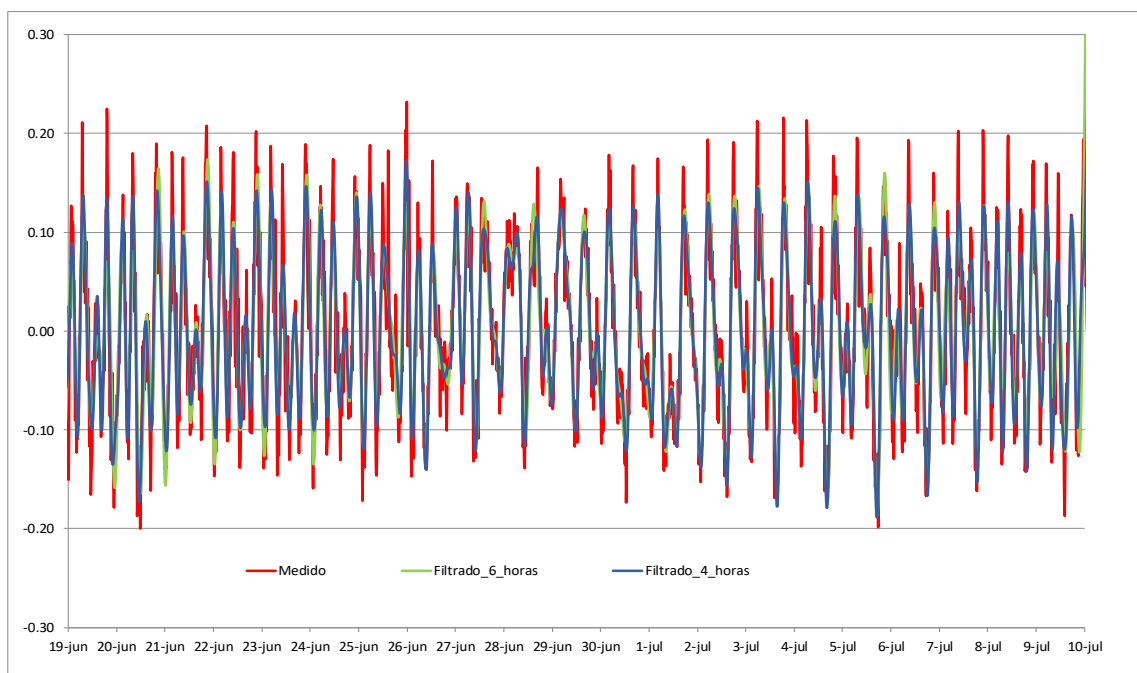
espectrais da componente Leste-Oeste durante o inverno. É possível observar os pontos extremos da variância (picos), que correspondem às frequências de 0,040, 0,080, 0,120, 0,160 e 0,242 cph, com períodos de 25,0, 12,5, 8,2, 6,2 e 4,13 horas, respectivamente. É possível observar vários picos com frequências maiores que 0,242 cph. As parcelas mais energéticas estão associadas às variações cíclicas de maré (período diurno e semidiurno), com frequências de 0,04 e 0,08 cph, e ter-diurna (8,2 h) e quarta-diurna (6,2h). A figura 13 mostra o resultado obtido para a componente da Leste-Oeste da velocidade medida e filtrada, para 4 horas e 6 horas. Os resultados do modelo foram comparados com os dados filtrados para 4 horas, ou seja, foram retiradas as oscilações com períodos menores que 4 horas. As demais componentes da velocidade têm o mesmo comportamento e foram filtradas para 4 horas.

FIGURA 12 - Comparação entre as densidades espectrais da componente Leste-Oeste da velocidade durante o inverno e média de 32 densidades espectrais de dados de correntes.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 13 - Comparação entre a componente Leste-Oeste da velocidade medida e filtradas, considerando um filtro para 4 e 6 horas, durante o inverno.



Fonte: A autora. 2021

### 3.4.2 Indicadores Estatísticos

Na etapa de calibração, com o uso de alguns indicadores estatísticos, alguns parâmetros do modelo foram ajustados, e comparações entre valores observados (medidos) e obtidos pelo modelo (calculados) foram realizadas com o objetivo de melhorar o ajuste. Para tanto, foram usados quatro indicadores estatísticos, a saber: o coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ), o erro médio absoluto (Mean Absolute Error - MAE), o coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de Eficiência ( $E$ ). O coeficiente de determinação descreve a fração da variância total nos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Seu valor varia entre 0,0 e 1,0, e quanto maior o valor, melhor a concordância entre modelo e observação. O erro médio absoluto (MAE) representa o desvio médio entre os valores medidos e calculados. Os valores serão apresentados em termos de “o” para os dados observados e “c” para calculados.

- Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ )

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), também chamado de correlação linear ou  $r$  de Pearson, é um grau de relação entre duas variáveis quantitativas e exprime o grau de correlação através de valores situados entre -1 e 1.

$$r = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (o - \bar{o})(c - \bar{c})}{N-1}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o - \bar{o})^2}{N-1}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (c - \bar{c})^2}{N-1}}} \quad (6)$$

Se  $r = 1$ , a correlação é perfeita e positiva entre as duas variáveis; se  $r = -1$ , significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis. Se  $r = 0$ , as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode existir outra dependência que seja "não linear". Assim, o resultado  $r = 0$  deve ser investigado por outros meios.

Ainda, Dancey e Reidy (2005) apontam uma classificação para as correlações positivas:  $r$  variando entre 0,00 e 0,29, correlação fraca;  $r$  entre 0,30 e 0,69, correlação moderada e;  $r$  maior que 0,70 indica uma forte correlação.

- Erro absoluto médio (MAE)

O erro médio absoluto relativo mostra o erro do modelo, em relação à soma dos dados medidos.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N (o - c)}{\sum_{i=1}^N o} \quad (7)$$

Martins (2011) indica a qualificação dos erros de acordo com os valores obtidos para MAE, que podem ser observados na tabela 7.

TABELA 7- Valores indicados para o erro absoluto médio relativo.

MAE	QUALIFICAÇÃO
$MAE < 0,2$	Excelente
$0,2 < MAE < 0,4$	Bom
$0,4 < MAE < 0,7$	Razoável
$0,7 < MAE < 1$	Ruim
$MAE > 1$	Péssimo

- Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )

O  $R^2$  é amplamente usado para a comparação entre o erro total do modelo com a variância dos dados, exemplifica a variabilidade dos dados que é reproduzida pelo modelo. É obtido como:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (o - \bar{o})(c - \bar{c})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (o - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (c - \bar{c})^2}} \right\}^2 \quad (8)$$

Segundo Rosman (2021), os valores de coeficiente de determinação maiores que 0,9 já indicam uma ótima correlação para dados de níveis.  $R^2$  acima de 0,8 indica uma boa concordância entre os dados medidos e os dados calculados para as componentes de velocidade.

- Coeficiente de Eficiência (E)

O coeficiente de eficiência foi desenvolvido por Nash & Sutcliffe (1970) e é utilizado com muita frequência para avaliar a eficiência dos modelos. Seu valor fica entre  $-1$  e  $1$ , e quanto maior o valor, melhor a concordância entre o modelo e observação. Pode ser calculado como:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o - c)^2}{\sum_{i=1}^N (o - \bar{o})^2} \quad (9)$$

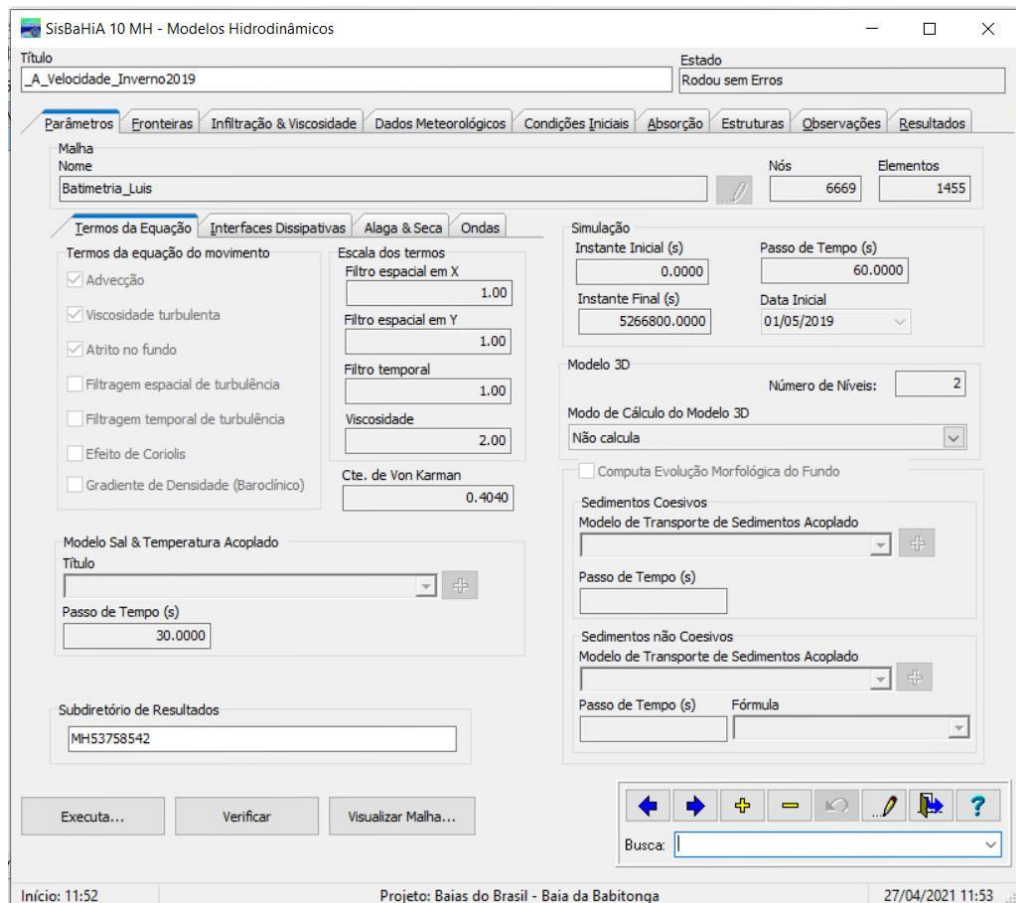
Valores maiores que zero já indicam uma boa concordância entre os dados medidos e calculados.

### 3.4.3 Parâmetros do modelo

Durante o processo de calibração foi possível aferir se o modelo hidrodinâmico representou adequadamente a variação de níveis de água e as correntes, nas seções de medição. Para tanto, um conjunto de parâmetros foi definido, dentro da faixa de variação definida em Rosman (2021), garantindo assim o significado físico dos parâmetros. A figura 14 mostra os parâmetros utilizados pelo modelo hidrodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>. É possível observar o passo

de tempo (60 segundos) e os termos definidos para as tensões turbulentas. Os mesmos parâmetros foram usados no processo de validação.

FIGURA 14 - Imagem da tela de modelos hidrodinâmicos do SisBaHiA® com os valores dos parâmetros usados no processo de calibração e validação.



Fonte: A autora. 2021

Com o modelo hidrodinâmico adequadamente calibrado e validado, pode-se calibrar o modelo de transporte de calor. Na verdade, a simulação do campo de velocidades é um pré-requisito para estudos de problemas associados à qualidade de água, considerando que o transporte de substância no meio fluido depende basicamente de fenômenos associados ao campo de velocidades, tais como o transporte advectivo e difusivo. Neste contexto, a correta caracterização da circulação hidrodinâmica é o primeiro passo no estudo da dispersão de escalares passivos, com os parâmetros relativos ao transporte difusivo ajustados.

Os parâmetros relacionados na simulação numérica do transporte adjetivo e difusivo do modelo de transporte de calor podem ser observados na figura 15. O coeficiente de difusão turbulenta representa a mistura devido à turbulência gerada principalmente pelo atrito no fundo, podendo ser decomposto segundo as direções longitudinais e transversais. Fischer (1979) parametrizou o coeficiente de difusão como função das escalas da dispersão longitudinal e transversal, usadas para facilitar a calibração, e da velocidade de atrito característica. Somada a este modelo é possível considerar valores constantes, fornecidos pelo modelador. Para a simulação da Idade da água e da Taxa de Renovação foram usados os mesmos valores usados no modelo de transporte de calor (Figura 16).

FIGURA 15 - Imagem da tela de modelos de qualidade de água do SisBaHiA®, para a temperatura com os valores dos parâmetros usados no processo de calibração e validação.

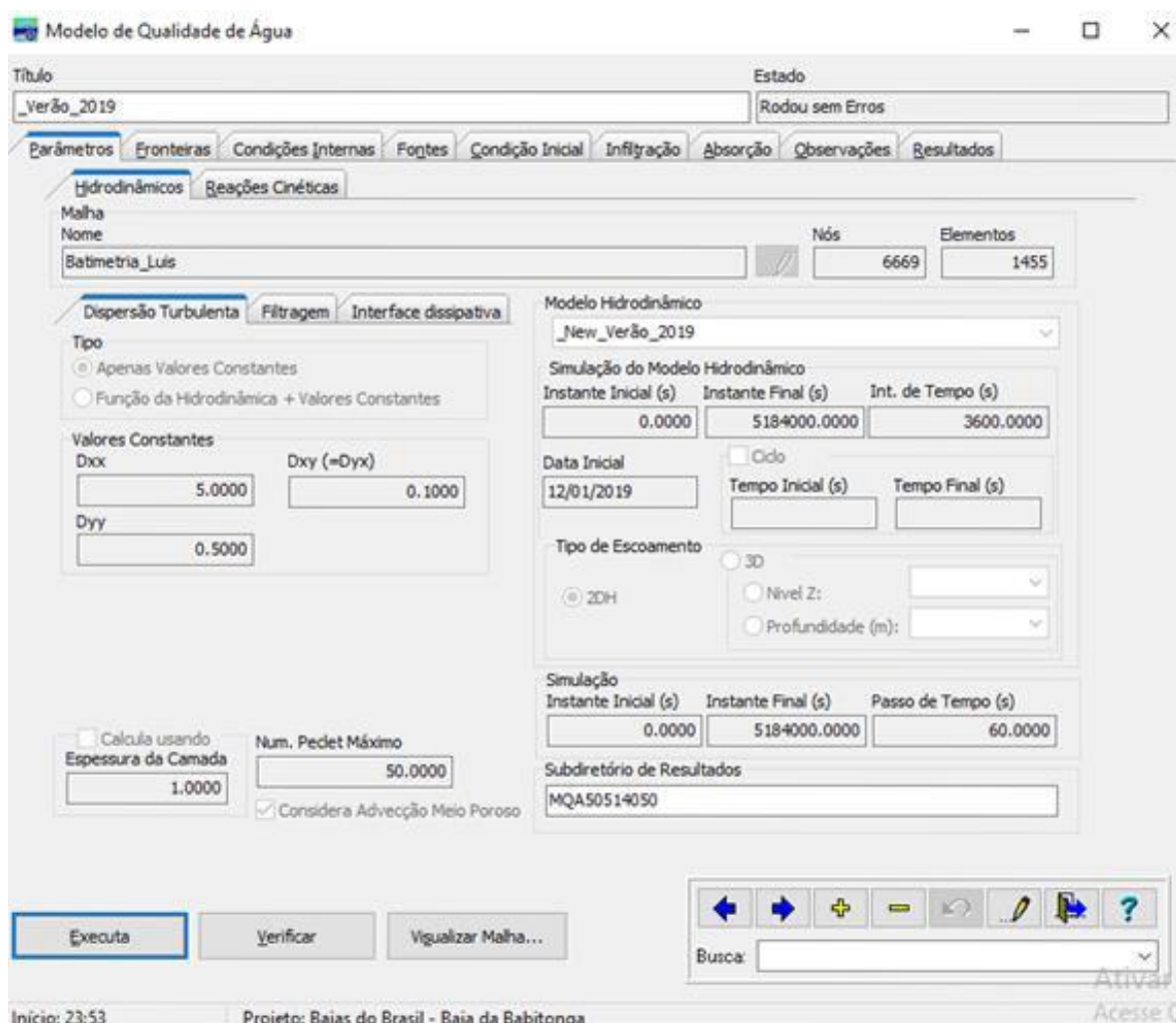




FIGURA 16 - Imagem da tela dos parâmetros utilizados para simular a Idade da água e Taxa de Renovação.

**SisBaHiA 10 - Modelos de Transporte Euleriano**

Título: \_IdadeÁgua\_Inverno2019 Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros Fronteiras Condições Internas Fontes Condição Inicial Infiltração Absorção Observações Resultados

Malha  
Nome: Batimetria\_Luis Nós: 6669 Elementos: 1455

Dispersão Turbulenta Filtragem Interface dissipativa Reações

Tipos de Coeficientes  
☐ Apenas Valores Constantes  
☒ Função da Hidrodinâmica + Valores Constantes

Valores Constantes  
 Dxx: 5.0000E+00 Dxy (=Dyx): 1.0000E-01  
 Dyy: 5.0000E-01

Escala da Dispersão  
 Longitudinal: 1.0000 Transversal: 1.0000

☐ Calcula usando  
 Espessura da Camada: 1.0000 Num. Pedet Máximo: 50.0000  
☒ Considera Advecção Meio Poroso

Modelo Hidrodinâmico  
 \_A\_Velocidade\_Inverno2019  
 Simulação do Modelo Hidrodinâmico  
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 5266800.0000 Int. de Tempo (s): 900.0000  
 Data Inicial: 01/05/2019 ☒ Cido  
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 4971600.0000

Tipo de Escoamento  
☒ 2DH  
☐ 3D  
☐ Nivel Z:  
☐ Profundidade (m):

Simulação  
 Instante Inicial (s): 0.0000 Instante Final (s): 12960000.0000 Passo de Tempo (s): 60.0000

Subdiretório de Resultados  
 ME52911160

Executa Verificar Visualizar Malha...

Busca:

Início: 11:38 Projeto: Baías do Brasil - Baía da Babitonga 02/05/2021 11:39

Fonte: A autora. 2021

Neste trabalho foram realizadas seis simulações da circulação hidrodinâmica: a primeira, no verão de 2019, entre 12/01/2019 e 30/03/2019 e segunda, entre 01/05/2019 e 30/06/2019 caracterizando o período de inverno, com valores médios de vazão fluvial e vento, obtidos para cada período. Essas duas simulações foram usadas para calibrar e validar o modelo. Uma terceira simulação foi realizada com os dados correspondente ao período de verão (maré, vento e vazão fluvial), com o acréscimo, na condição de contorno na fronteira aberta, da variação do nível médio do mar prevista para 2100 com RCP 4.5 e a quarta, semelhante à terceira, só que para o período de inverno. A quinta e sexta simulações foram similares à terceira e à quarta só que para a variação do nível médio do mar prevista para 2100 com cenário de RCP 8.5. Para os

cenários de 2100, utilizou-se os mesmos parâmetros do modelo hidrodinâmico usados durante a calibração e a validação, apenas foram alterados os valores provenientes da condição de contorno de fronteira aberta (que aplicou a elevação do nível médio do mar), assim como aplicou-se os mesmos parâmetros do modelo Euleriano porém com o modelo hidrodinâmico considerando a elevação do nível médio do mar.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

#### 4.1.1 Calibração do Modelo Hidrodinâmico

Primeiramente foram realizadas verificações da discretização, da geometria, da batimetria e da distribuição da amplitude da rugosidade do fundo da baía, usando como base os dados obtidos no site [baidobrasil.coppe.ufrj.br](http://baidobrasil.coppe.ufrj.br). Posteriormente foram realizadas simulações com diferentes passos de tempo, com objetivo de obter uma melhor aproximação entre os valores da posição da superfície livre medidos e simulados. Os dados medidos entre 12 de janeiro e 12 de março de 2019 (verão) foram usados para calibrar o modelo e, o conjunto de dados medidos entre 01 de maio e 30 de junho de 2019 (inverno), usados para validá-lo.

A malha usada na discretização do domínio possui 1445 elementos quadriláteros e 6.669 nós. O intervalo de tempo usado nas simulações da circulação hidrodinâmica foi de 60 segundos, que corresponde a um número de Courant médio igual a 5,6. Para a condição inicial, o modelo teve um período de aquecimento de dois ciclos de maré, com o objetivo de minimizar qualquer influência das condições iniciais em relação aos resultados obtidos.

A fronteira aberta é formada por 47 nós, onde a posição da superfície livre é prescrita, sendo imposta a curva de maré medida na Ilha da Paz; na fronteira de terra, exceto os que correspondem aos rios, todos os nós de contorno foram considerados impermeáveis, com fluxo normal nulo. Nos nós correspondentes aos rios afluentes foram prescritas vazões permanentes. Os valores de vazão usados para os períodos de verão e inverno estão dispostos na Tabela 5. O vento foi considerado não permanente e uniforme, usando dados da estação INMET.

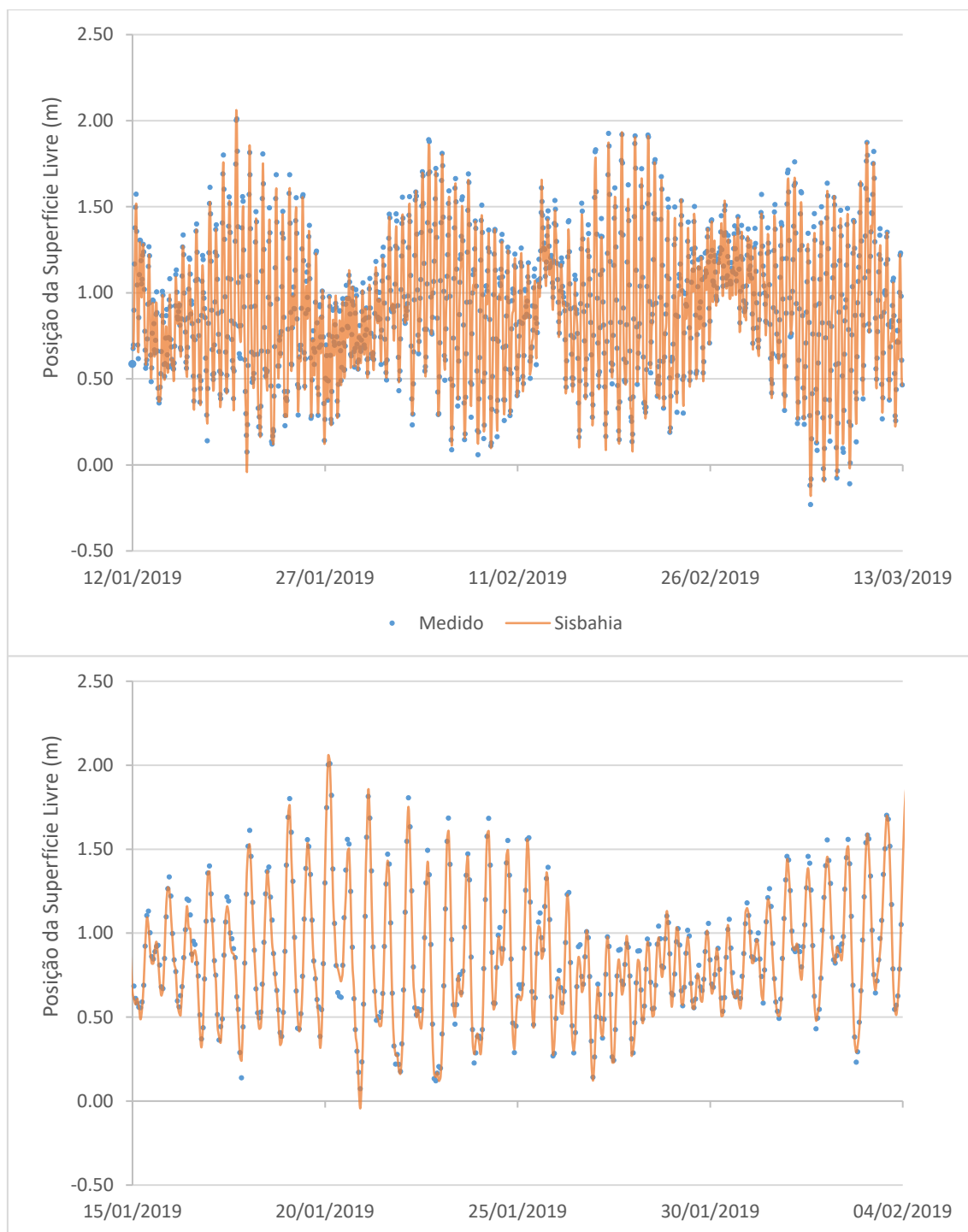
As figuras 17, 18 e 19 mostram a comparação entre os dados medidos e os valores da posição da superfície livre calculados pelo SisBaHiA® para as três estações. Observa-se uma excelente concordância em relação à fase e amplitude entre os resultados. No que se refere a amplitude, há uma pequena

atenuação nos valores obtidos pelo SisBaHiA® em relação aos valores medidos nas preamares de sizígia. Os coeficientes de correlação, erro absoluto médio relativo, coeficiente de determinação e de eficiência obtidos podem ser considerados excelente para todas as estações (Tabela 8).

Os parâmetros estatísticos calculados mostram que o modelo reproduz os dados medidos com precisão, nas duas estações: Itapoá e São Francisco do Sul. Os  $R^2$ s estão próximos de 1,0, e MAEs mostram desvios menores que 0,08 m; na estação late Clube de Joinville, os MAEs mostram desvios menores que 0,16 m, também um ótimo resultado. No entanto, é possível observar que a estação late Clube de Joinville, localizada dentro da lagoa do Saguacú, apresenta o pior ajuste. Esta estação está localizada na região mais interna da baía e sofre à amplificação da onda de maré; esse comportamento é comum em regiões internas de baías devido à presença de regiões mais rasas. Sendo assim, nesta estação, o ajuste é pior, devido aos processos de amplificação da onda de maré, que são fortemente influenciados pela batimetria e ainda, a estação late Clube de Joinville está localizada dentro da lagoa do Saguacú e a malha na região do canal, que liga a lagoa à baía, é pouco refinada, como uma interpolação pobre da batimetria. Recomenda-se o refinamento da malha e ajuste da batimetria no canal, para melhorar a acurácia dos resultados.

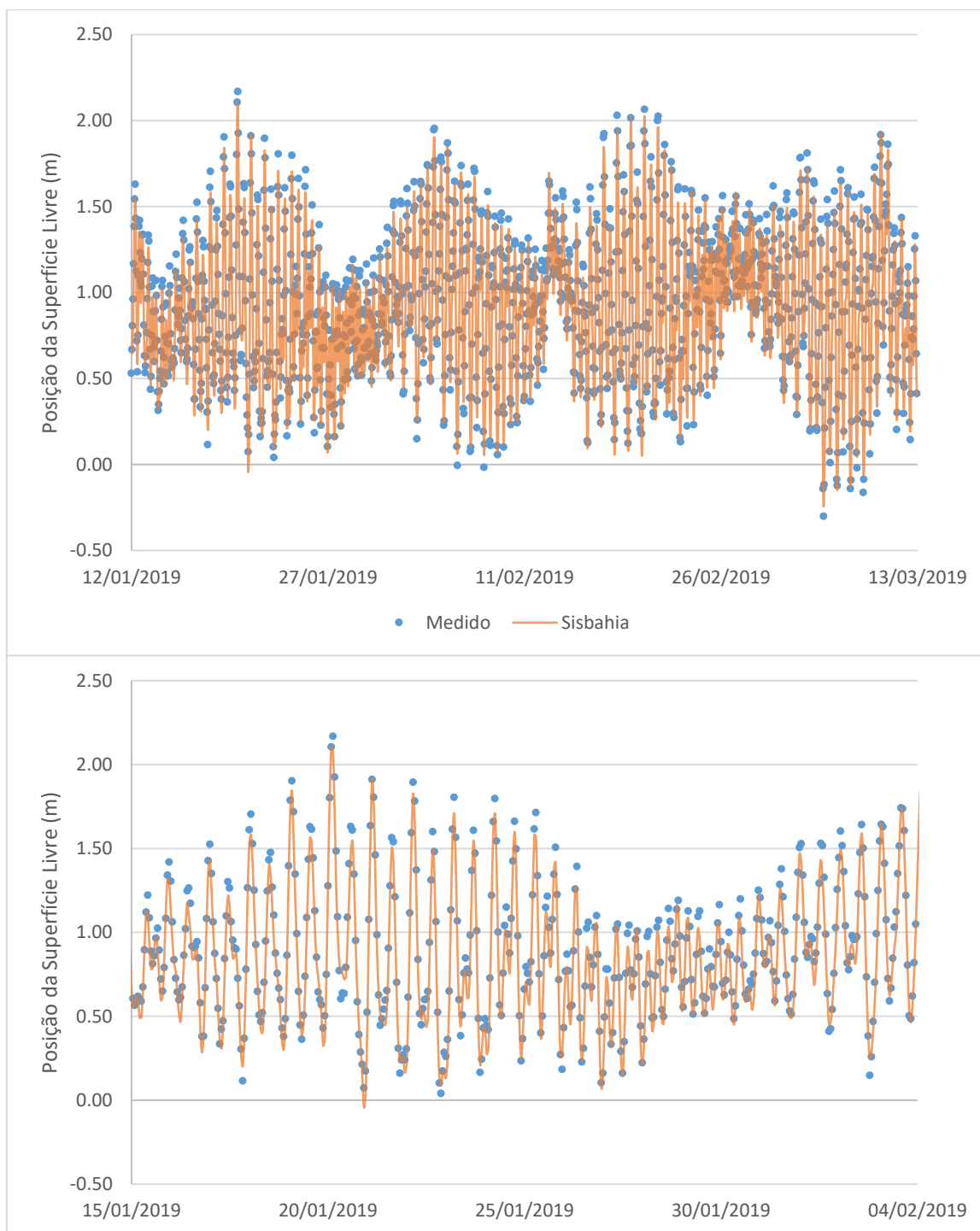
Observando os diagramas de dispersão (figuras 20, 21 e 22), os valores de  $R^2$  obtidos foram superiores a 0,905, indicando uma ótima concordância; os valores de coeficiente de determinação maiores que 0,90 já indicam uma boa correlação. Martins (2011), ao calibrar o modelo hidrodinâmico para a variação da superfície livre, usado para calcular a retenção de ovos de peixe na baía da Babitonga, obteve valores de  $R^2$  acima de 0,80, e, eficiência e coeficiente de Pearson superior a 0,90, indicando uma boa concordância. De acordo com a classificação proposta por Walstra et al (2002), os valores de MAEs, 0,062 m, 0,080 m e 0,161 m, obtidos para as estações de Itapoá, São Francisco – Tesc II e late Clube de Joinville, respectivamente, classificam o ajuste obtido pelo modelo como excelente.

FIGURA 17 – Valores de posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do porto de Itapoá e simulados pelo SisBaHiA®, para o verão de 2019.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 18 – Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do Terminal de Santa Catarina – TESC II e simulados pelo SisBaHiA® para o verão de 2019.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 19 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do late Clube de Joinville e simulados pelo SisBaHiA® para o verão de 2019.

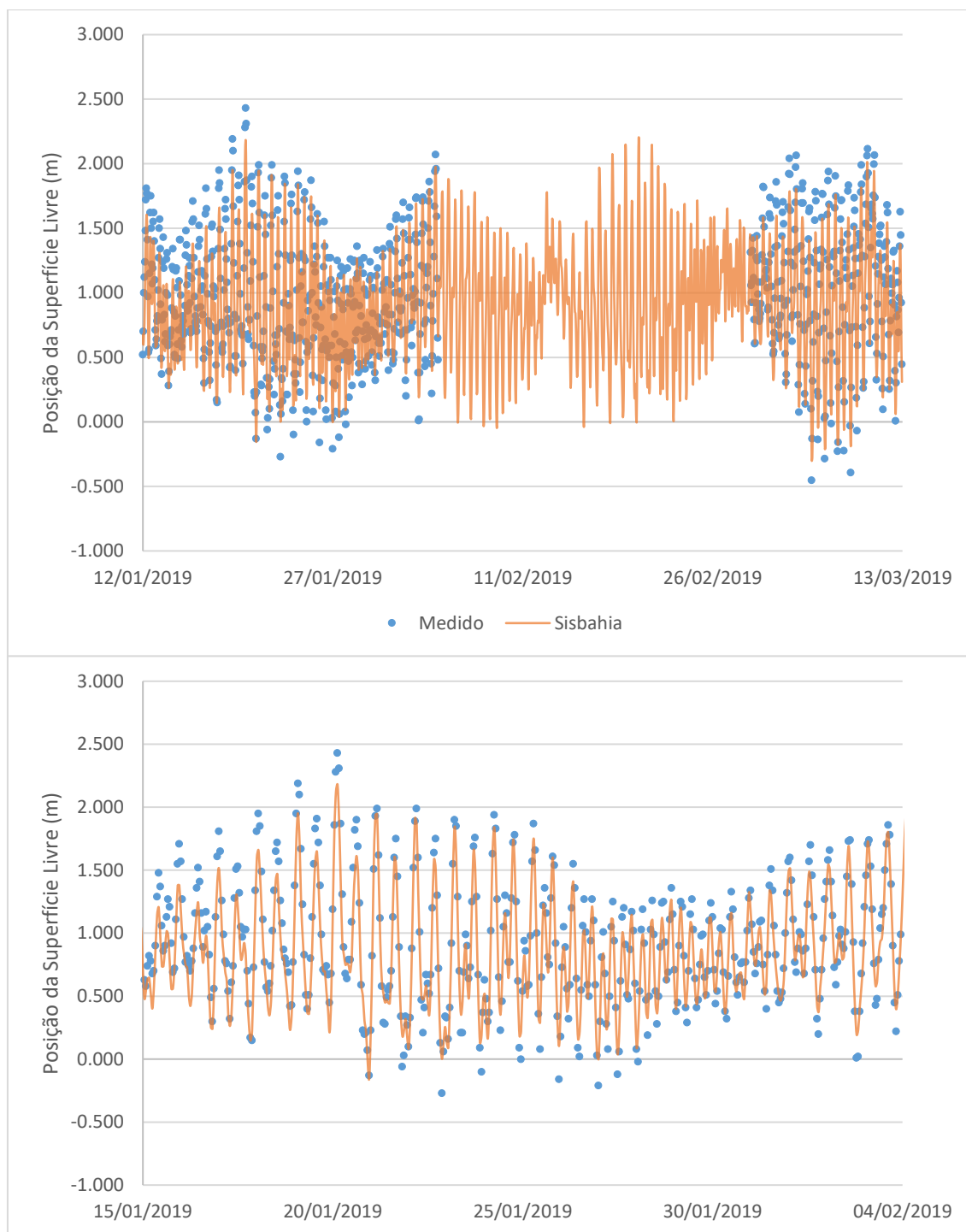
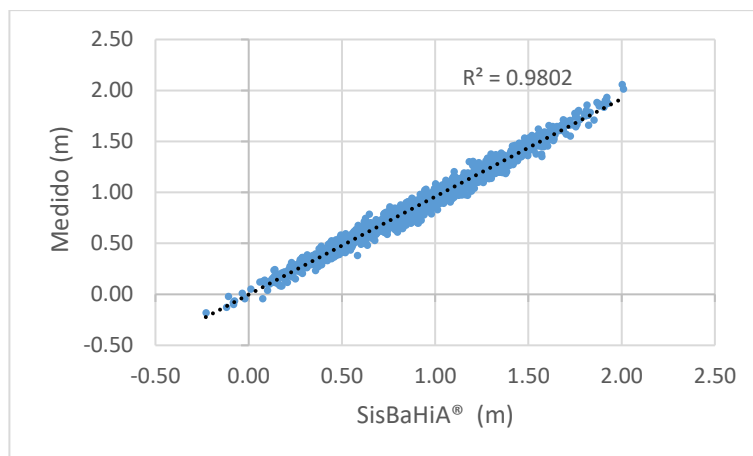
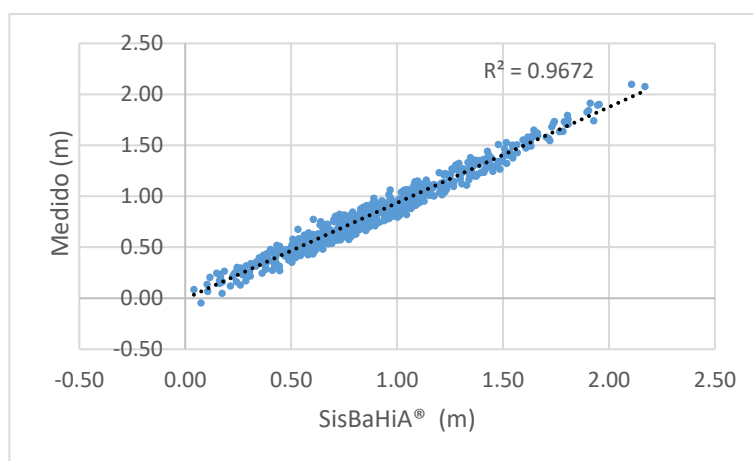


FIGURA 20 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas do porto de Itapoá.



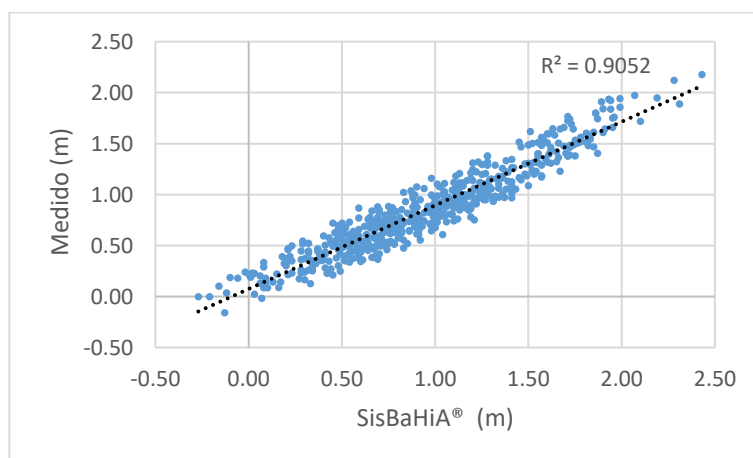
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 21 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas de São Francisco – TESC II.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 22 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o verão de 2019, na estação marégrafas do late Clube de Joinville.



Fonte: A autora. 2021



TABELA 8 - Valores dos índices estáticos: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência (E) entre os dados medidos e calculados da variação da superfície livre nas estações marégrafas.

Estação	$r$	MAE(m)	$R^2$	E
Itapoá	0.990	0.062	0.977	0.998
São Francisco - TESC I	0.988	0.080	0.967	0.995
Iate Clube de Joinville	0.952	0.161	0.905	0.987

Fonte: A autora. 2021

- **Componentes da Velocidade:**

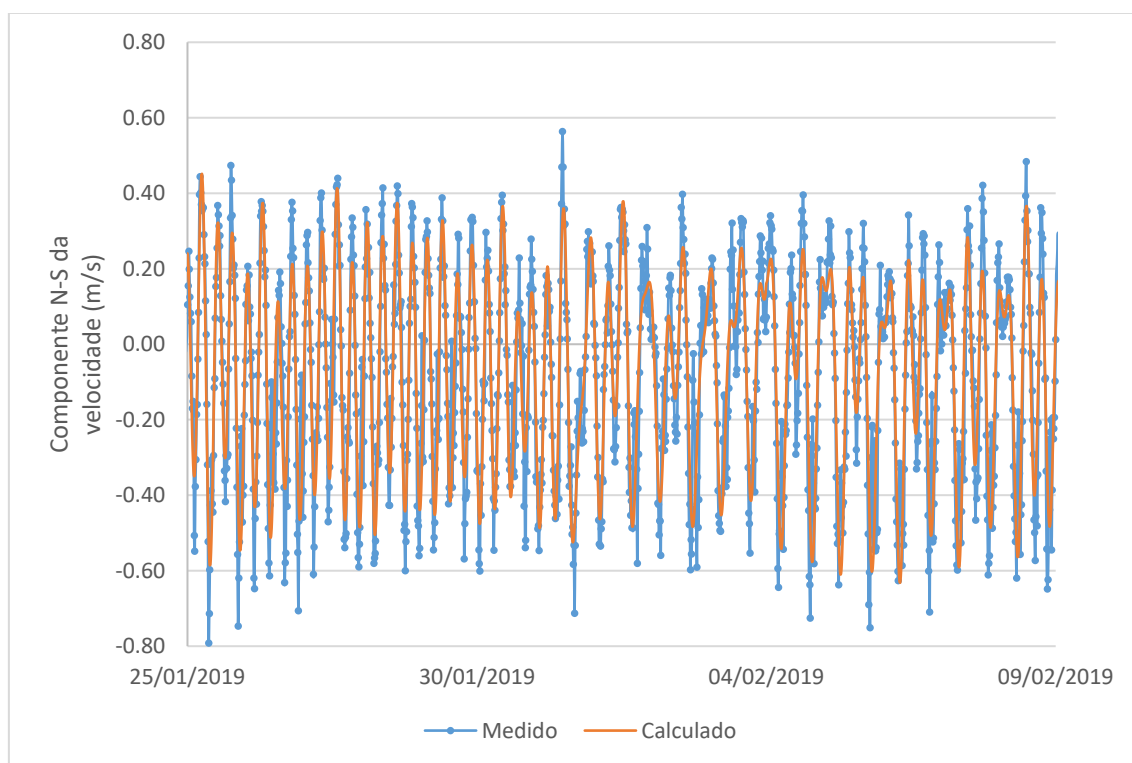
Os dados das campanhas apresentados em Noerberg et al. (2020) no Canal do Palmital, durante o período de verão, entre 21 de janeiro de 2019 a 11 de fevereiro de 2019, foram usados para calibrar os valores da velocidade de corrente. As figuras 23 e 25 mostram a comparação entre os dados medidos, filtrados em 4 horas, os resultados calculados pelo SisBaHiA® das componentes Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O) das velocidades de correntes para o período de verão; as figuras 24 e 26, os diagramas de dispersão da componente Norte-Sul e Leste-Oeste das velocidades de correntes medidas e simuladas, respectivamente.

A comparação entre os valores medidos e calculados da componente N-S das velocidades de correntes, apresentou bom ajuste em relação à fase. No entanto, o modelo reduziu a amplitude. Mesmo comportamento pode ser observado em relação a componente L-O da velocidade. Em relação aos diagramas de dispersão e os parâmetros estatísticos (Tabela 9), os valores mostram um bom comportamento do modelo. Os  $R^2$  estão acima de 0,77, indicando uma boa correlação; as eficiências do modelo estão acima de 0,97 e MAE mostram desvios menores que 0,074 m/s, valores bastante aceitáveis. Vale mencionar a perda de qualidade do modelo em relação a componente Leste-Oeste da velocidade, provavelmente devido a inconsistência dos dados batimétricos da região.

Em um estudo semelhante, Fielder (2015), ao calibrar o modelo hidrodinâmico para estudar a dinâmica estuarina de aumento do nível médio do mar para a baía de Santos, obteve valores para o coeficiente de determinação entre 0,56 e 0,68 para as componentes da velocidade, além de apresentar

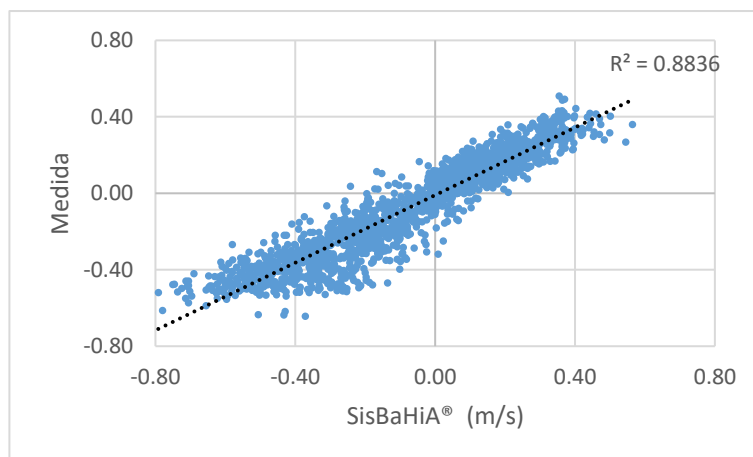
valores do coeficiente de correlação de 0,68, concluindo que o modelo apresentava uma boa correlação e evidenciando a acurácia do modelo ao representar as situações reais. Sendo assim, é possível afirmar que o modelo apresenta bons resultados no processo de calibração para as componentes da velocidade.

FIGURA 23 - Componente Norte-Sul das velocidades de correntes (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, para o período de verão de 2019.



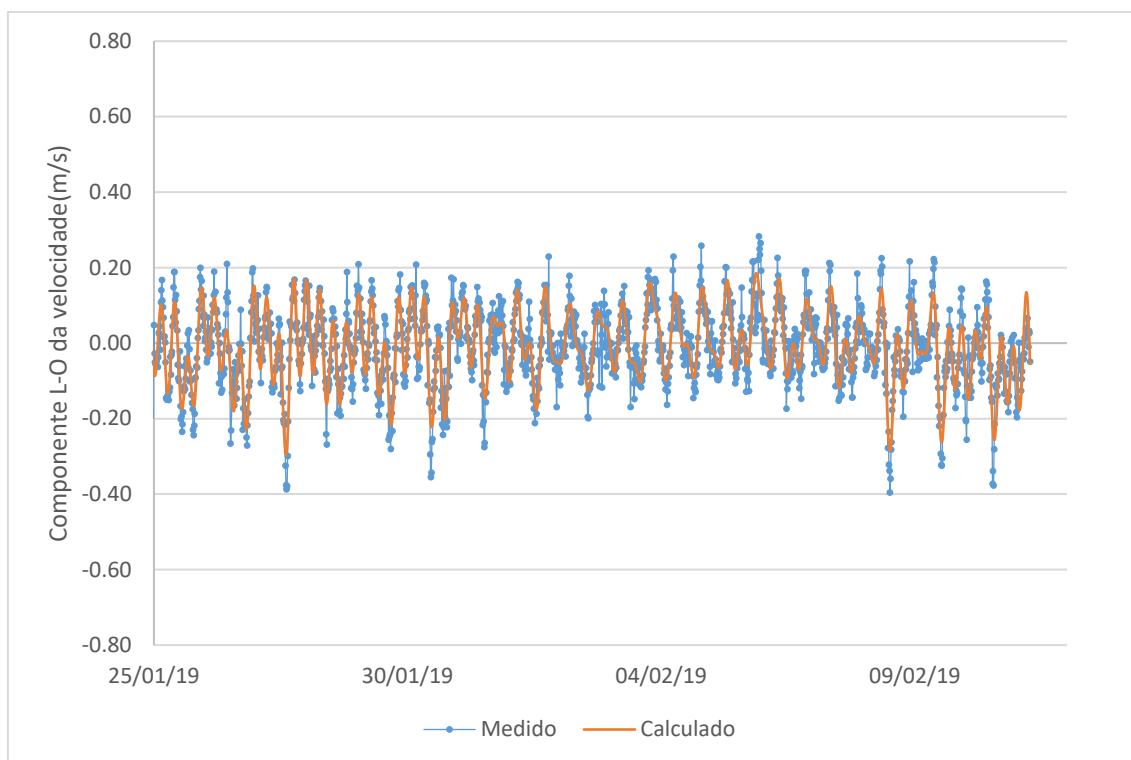
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 24 - Diagrama de dispersão da componente Norte-Sul das velocidades de correntes medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital.



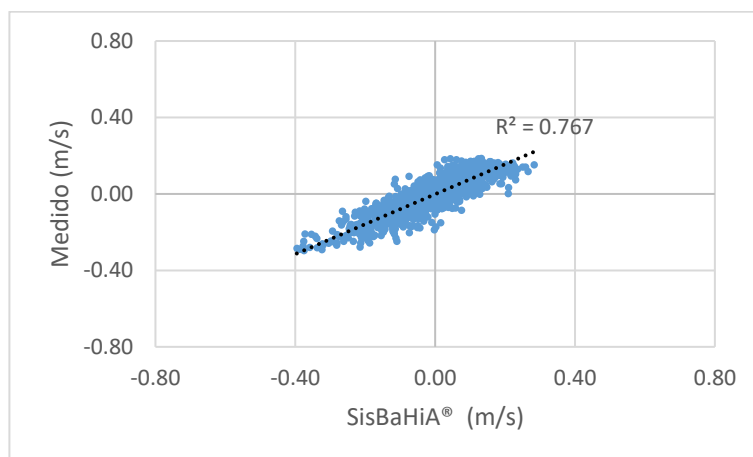
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 25 - Componente Leste-Oeste das velocidades de correntes (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, para o período de verão de 2019.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 26 - Diagrama de dispersão da componente Leste-Oeste das velocidades de correntes medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital.



Fonte: A autora. 2021

TABELA 9- Valores dos índices estáticos; coeficiente de correlação ( $r$ ), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência ( $E$ ) entre os dados medidos e calculados para as componentes Norte-Sul e Leste-Oeste de velocidade no Canal do Palmital durante o verão.

Componente da Velocidade	$r$	MAE (m/s)	$R^2$	$E$
Norte-Sul (m/s)	0.940	0.003	0.884	1.00
Leste-Oeste (m/s)	0.876	0.074	0.767	0.97

Fonte: A autora. 2021

- **Temperatura:**

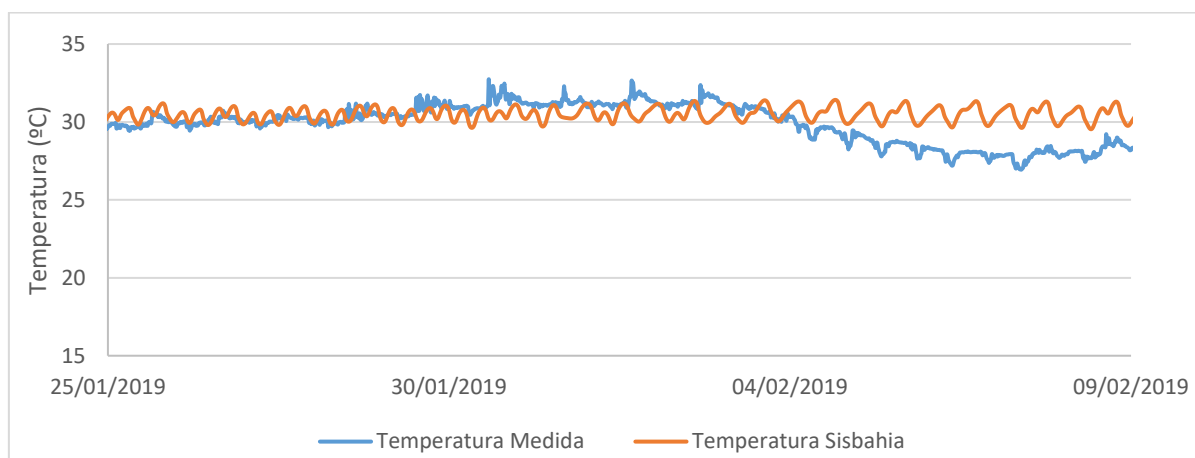
Para calibrar o modelo de transporte Euleriano, foi utilizado os dados obtidos de temperatura da água próxima ao fundo, apresentados em Noerberg et al. (2020) no Canal do Palmital, durante o período de verão entre 24 de janeiro de 2019 a 11 de fevereiro de 2019. A partir da comparação entre os dados medidos e calculados pelo SisBaHiA® foi possível ajustar os parâmetros de dispersão horizontal ( $D_{xx}$ ) e ( $D_{yy}$ ) para a calibração do modelo. A figura 27 mostra os valores de temperatura obtidos pelo modelo e os medidos no Canal do Palmital.

O erro absoluto médio percentual foi de 4% para o período do verão de 2019 (erro médio absoluto, MAE, de 0,039 °C), com erro máximo relativo de 12%, o que indica uma ótima concordância. Em trabalho semelhante, Dalazen et al. (2020) na baía de Paranaguá obteve erro relativo médio de 4% ao utilizar a temperatura para calibrar o modelo de transporte, com erros relativos não superiores a 15%.

Coerências entre valores medidos e valores computados de concentração de contaminantes ou parâmetros de qualidade de água são semelhantes às verificadas para velocidade e direção de correntes. Como os modelos de transporte recebem como dados de entradas os resultados de níveis e correntes dos modelos hidrodinâmicos, a confiabilidade dos modelos de transporte é intrinsecamente função da qualidade dos resultados hidrodinâmicos.

Uma divergência entre os valores medidos e calculados é visto, principalmente entre o dia 04/02/2019 e 09/02/2019. Possivelmente esta divergência é devida aos valores de radiação, que foram calculados pelo modelo com cobertura de nuvens constante para todo o período simulado.

FIGURA 27 - Valores de temperatura medida e calculada no Canal do Palmital para entre os dias 24 de janeiro de 2019 à 11 de fevereiro de 2019.



Fonte: A autora. 2021

#### 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

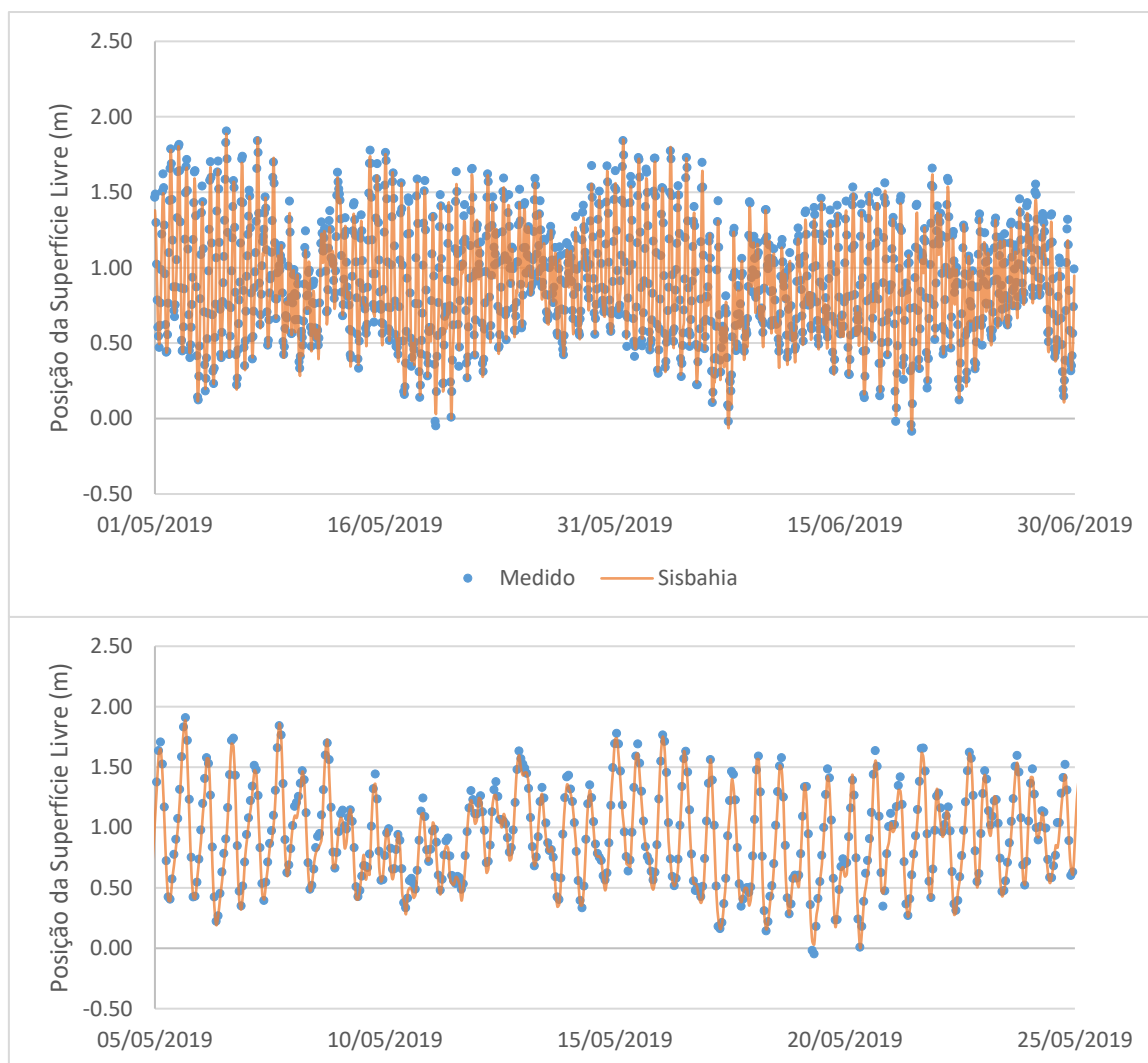
Os resultados das simulações realizadas para a validação do modelo, feitos para o período de maio e junho de 2019, e sua comparação com os dados medidos do nível do mar nas estações marégrafas do porto de Itapoá, Terminal de Santa Catarina II e para o late Clube de Joinville, são apresentadas nas figuras 28, 29 e 30, respectivamente.

Os parâmetros dos modelos foram os mesmos usados no processo de calibração: a malha usada na discretização do domínio, o intervalo de tempo usado nas simulações da circulação hidrodinâmica e os coeficientes relacionados às tensões turbulentas. Para a condição inicial, a posição da superfície livre foi imposta pelos valores medidos da curva de maré na ilha da Paz, e os valores de vazão foram dados de acordo com os valores dispostos na tabela 5 para o período de inverno. O vento foi considerado não permanente e uniforme, usando dados da estação INMET.

Observa-se que os resultados do modelo hidrodinâmico apresentam boa correlação, eficiência e ótimos valores para o coeficiente de determinação e erro absoluto médio relativo, no comparativo entre os dados medidos e calculados, resumidos na tabela 10. Observa-se que a fase e amplitude estão em concordância com os resultados.

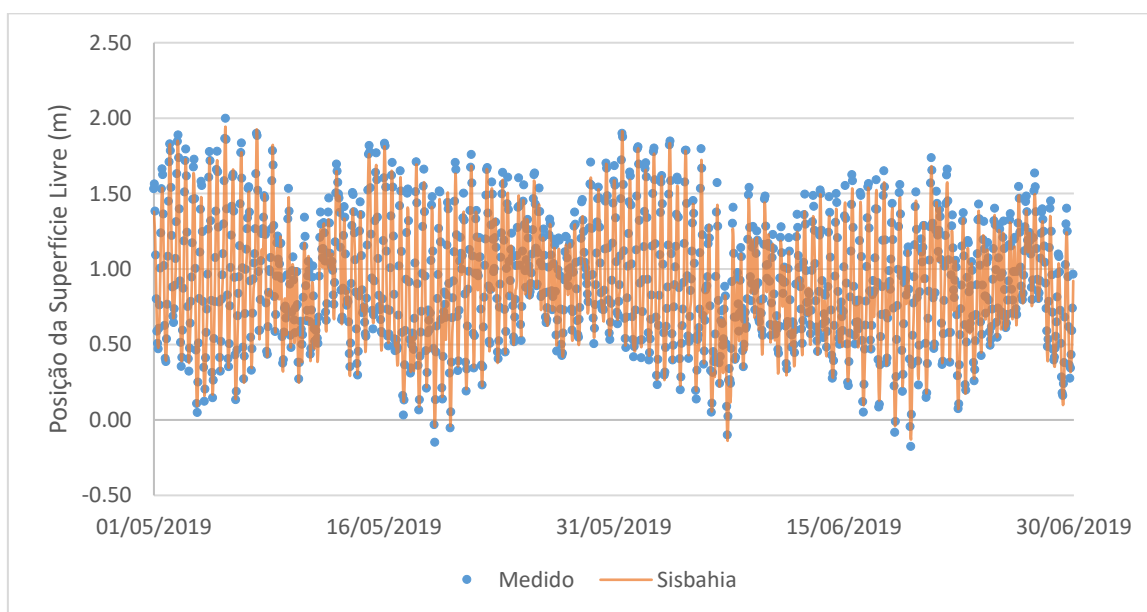
O modelo reproduz com precisão os dados medidos nas estações de Itapoá, São Francisco do Sul – TESC II e no late Clube de Joinville a partir dos valores calculados dos parâmetros estatísticos. Os valores dos coeficientes de correlação são próximos a 1,0 e os valores de MAE's mostram desvios menores que 0,183 m, em que valores inferiores a 0,20 são bons resultados. Ao observar os resultados é visto que a estação do late Clube de Joinville, localizada dentro da lagoa do Saguauçu, apresenta o pior ajuste devido a estar localizada na região mais interna da baía e sofrer amplificação da onda de maré. As figuras 31, 32 e 33 apresentam valores de  $R^2$ 's superiores a 0,908 indicando uma ótima concordância, visto que valores maiores que 0,90 já indicam boa correlação.

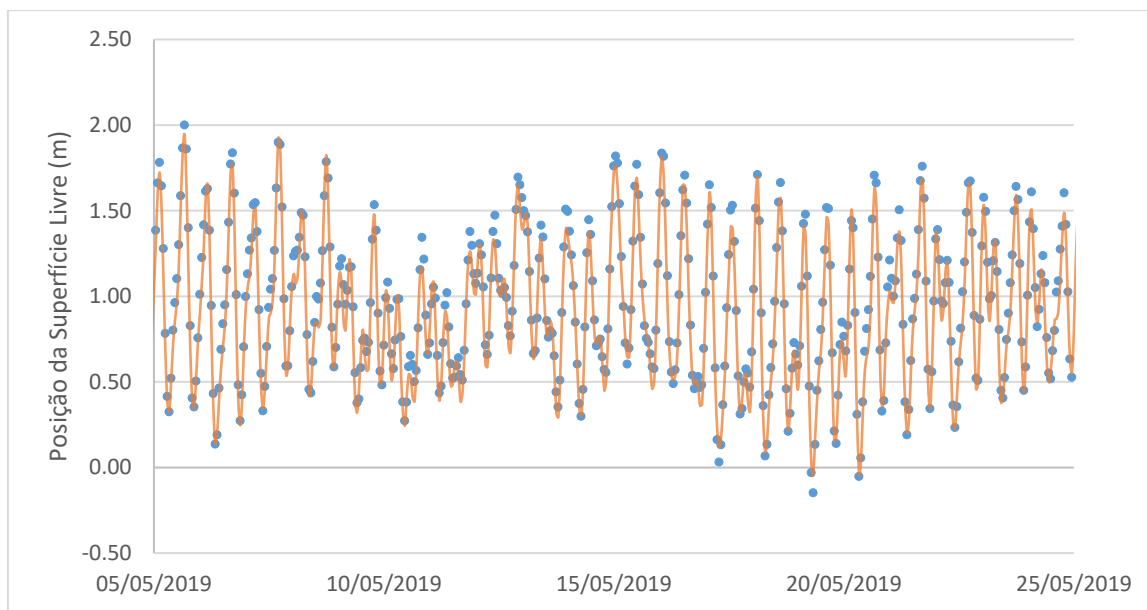
FIGURA 28 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do porto de Itapoá e simulados pelo SisBaHiA®, para o inverno 2019.



Fonte: A autora. 2021

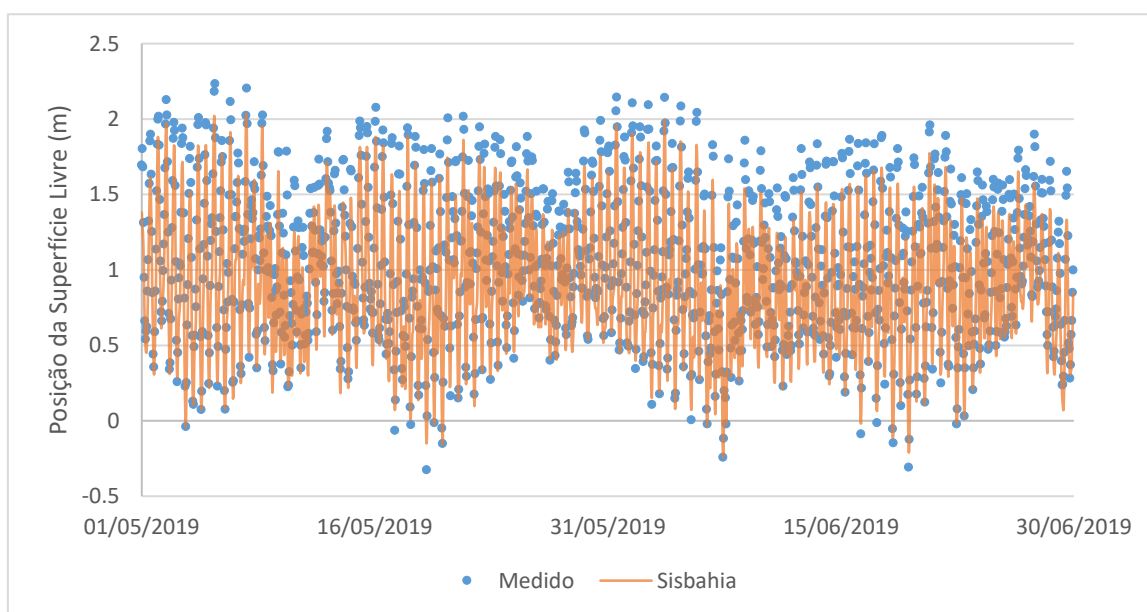
FIGURA 29 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafo de São Francisco do Sul – TESC II e simuladas pelo SisBaHiA®, para o inverno de 2019.



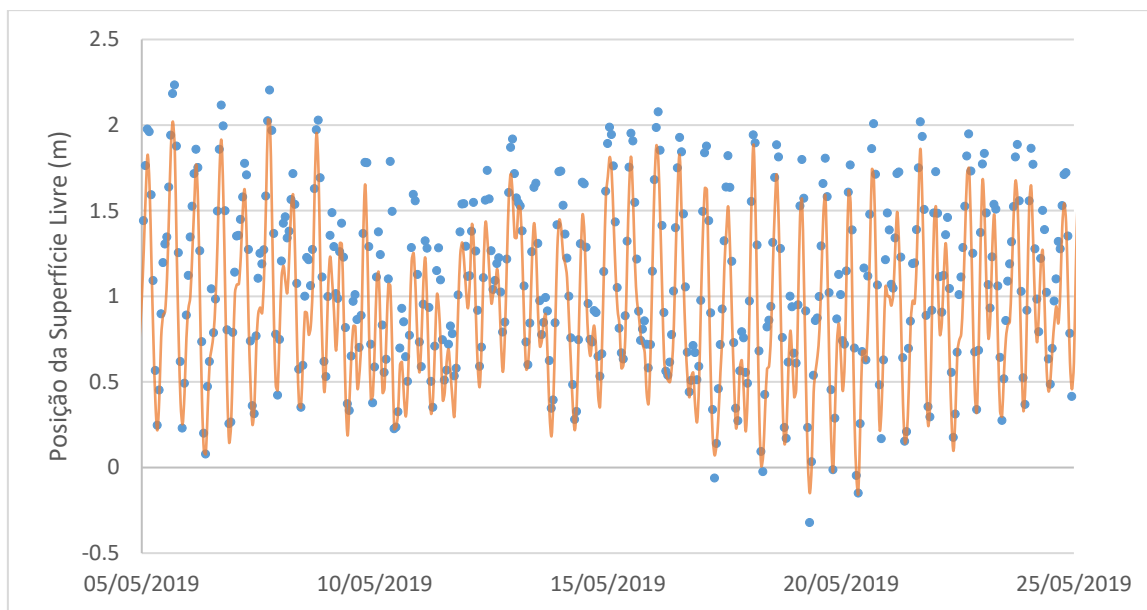


Fonte: A autora. 2021

FIGURA 30 - Valores da posição da superfície livre medidos (em metros) na estação marégrafa do Iate Clube de Joinville simuladas pelo SisBaHiA®, para o inverno de 2019.

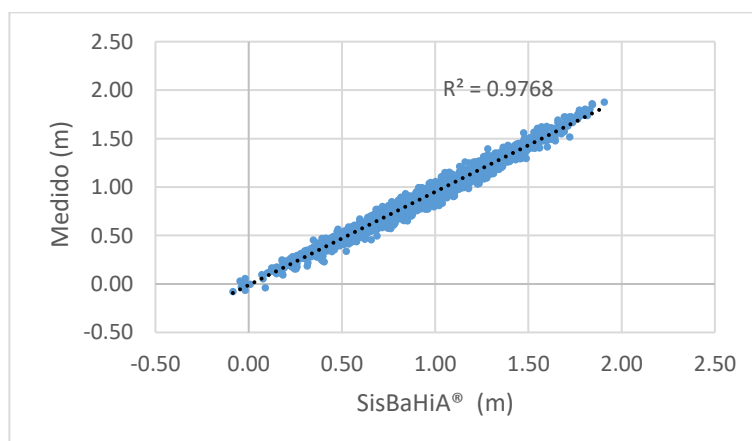






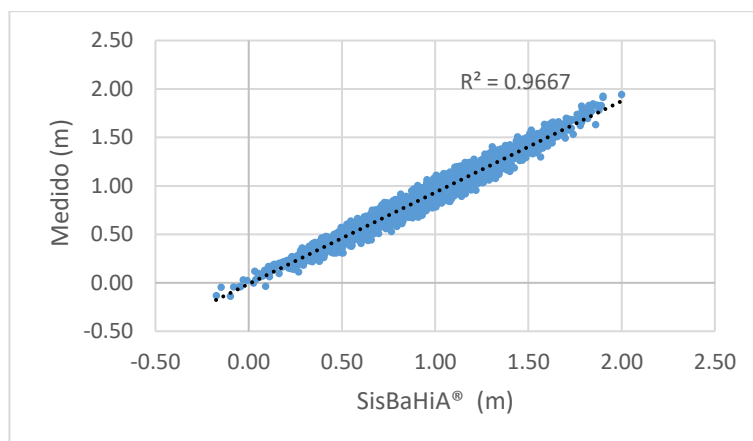
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 31 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa de porto de Itapoá.



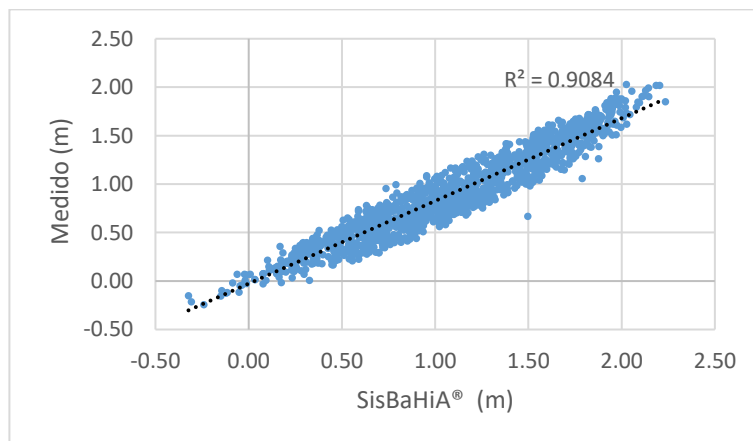
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 32 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa de Terminal de Santa Catarina II.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 33 - Diagramas de dispersão dos valores da posição da superfície livre medidos e simulados, para o inverno de 2019, na estação marégrafa do late Clube de Joinville.



Fonte: A autora. 2021

TABELA 10 - Valores de correlação ( $r$ ), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência ( $E$ ) para os dados medidos e calculados da variação da superfície livre nas estações marégrafas, para o inverno de 2019.

Local	$r$	MAE (m)	$R^2$	$E$
Itapoá	0.988	0.065	0.977	0.997
São Francisco - TESC I	0.983	0.086	0.967	0.995
late Clube de Joinville	0.953	0.183	0.908	0.957

Fonte: A Autora. 2021

### • Componentes da Velocidade

O modelo foi validado a partir dos dados de velocidade medidos por Noerberg et al. (2020) no Canal do Palmital durante o período de inverno, entre o dia 18 de junho de 2019 a 24 de julho de 2019, filtrados em 4 horas, e

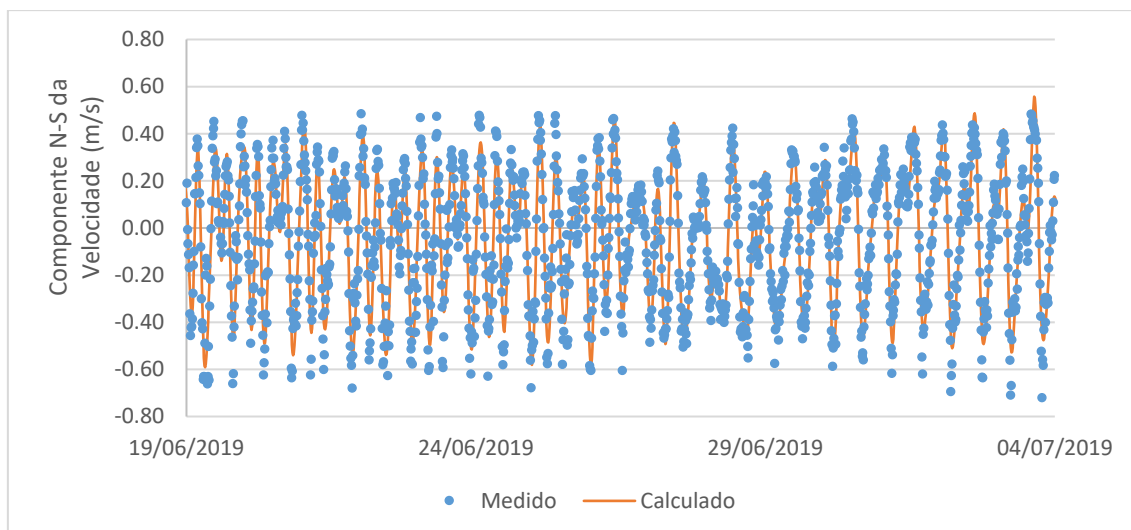
comparados com os dados da velocidade da corrente simulados pelo SisBaHiA® das componentes Norte-Sul (N-S) e Leste-Oeste (L-O) das velocidades de correntes para o período de inverno, como mostram as figuras 34 e 36.

A partir da observação entre os dados medidos e calculados da componente N-S da velocidade, o modelo apresentou boa concordância de fase, atenuando a amplitude; este mesmo comportamento pode ser visto para as componentes L-O da velocidade. Os coeficientes de correlação e de determinação da componente N-S (figura 35) e L-O (figura 37) estão acima de 0,854, indicando uma ótima concordância dos dados, com valor de eficiência de 0,99 e MAE's apresentam desvios inferiores a 0,004 m/s (tabela 11). No que se refere à intensidade de corrente, há uma atenuação nos valores obtidos pelo SisBaHiA® em relação aos valores medidos.

Como a estação onde os dados foram medidos está localizada em um canal raso e estreito, onde a batimetria e a largura do canal principal são muito irregulares, desvios na direção e no sentido das correntes podem ser provocados pela suavização da topografia de fundo realizada pelo modelo e ainda, por pequenas irregularidades locais na topografia de fundo que não são possíveis de serem representadas no modelo. Sendo assim, as velocidades de corrente apresentam-se bastante variáveis no espaço e uma pequena diferença de posição pode significar grandes mudanças nos valores de velocidade. Para obter uma melhor aproximação com os dados de campo, seria necessário refinar a malha nesta região para obter a resolução necessária para a distribuição de velocidades.

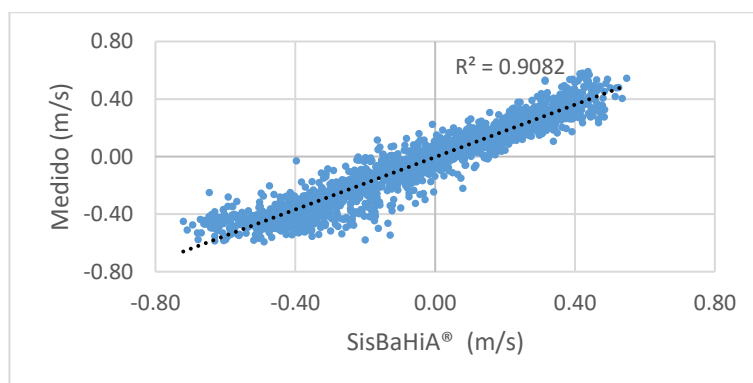
O ajuste obtido pelo modelo para o período de validação é melhor, comparado com o período de calibração. O ponto escolhido para medição de correntes fica próximo à embocadura do rio Cubatão e, certamente, as correntes neste ponto sofrem influência da vazão deste rio, que é maior no verão, período de calibração, do que no inverno, período de validação. Como as vazões impostas no modelo são permanentes para o período, variações de vazão podem influenciar as medições e não foram consideradas pelo modelo.

FIGURA 34 - Valores das Componentes de velocidade Norte – Sul (m/s) calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, apresentados pelo eixo principal, para o período de inverno de 2019.



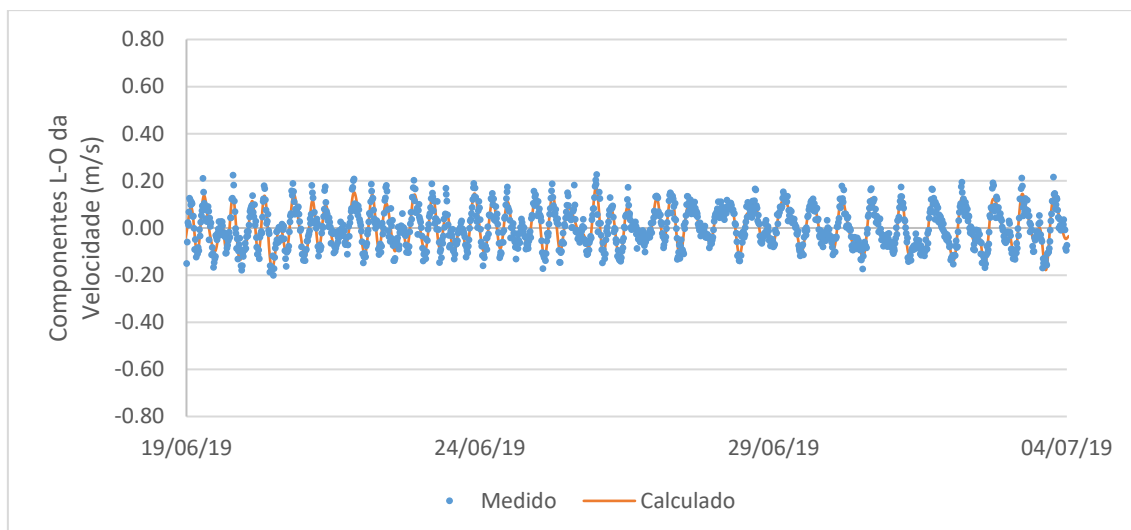
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 35 - Diagramas de dispersão da componente Norte-Sul da velocidade medidas e simuladas, para o inverno de 2019, no Canal do Palmital.



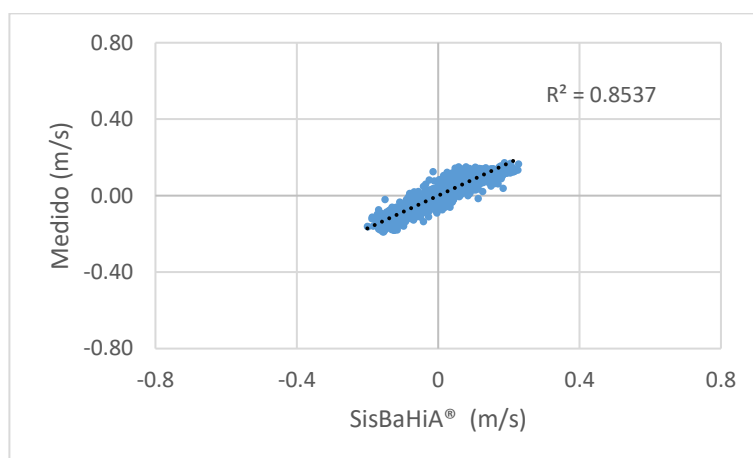
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 36 - Valores das componentes de velocidade Leste- Oeste (m/s), calculados pelo SisBaHiA® e medidos no Canal do Palmital, apresentados pelo eixo principal, para o período de inverno de 2019.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 37 - Diagramas de dispersão da componente Leste- Oeste da velocidade medidas e simuladas, para o verão de 2019, no Canal do Palmital



Fonte: A autora. 2021

TABELA 11 - Valores de correlação ( $r$ ), erro absoluto médio (MAE), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e eficiência ( $E$ ) para os dados medidos e calculados para as componentes da velocidade N - S(m/s), sentido Norte/S, e velocidade L-O (m/s) no Canal do Palmital.

Componente da Velocidade	$r$	MAE (m/s)	$R^2$	$E$
Norte – Sul (m/s)	0.909	0.001	0.908	1.00
Leste- Oeste (m/s)	0.876	0.004	0.854	0.99

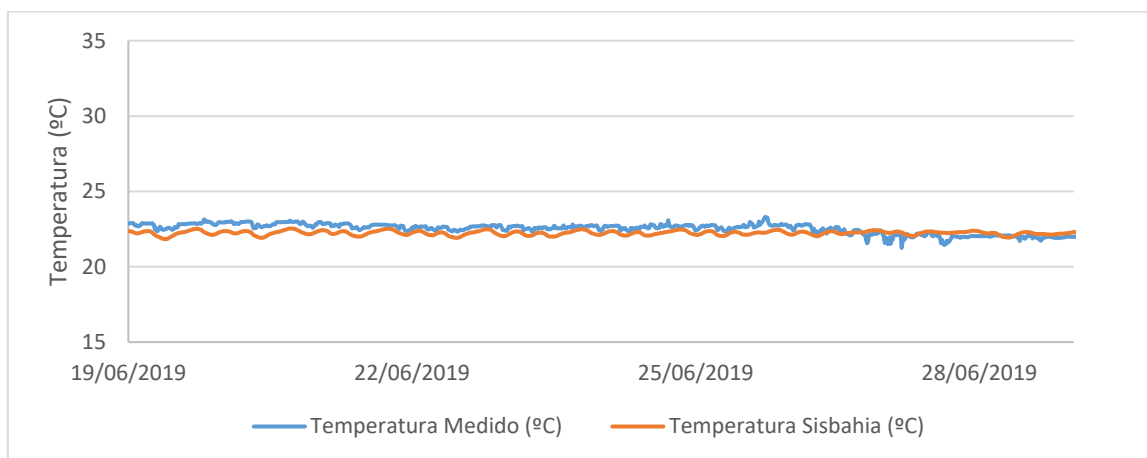
Fonte: A autora. 2021

- **Temperatura:**

A validação do modelo de transporte de calor é dada a partir da comparação entre os dados calculados e medidos no Canal do Palmital para o período de inverno, entre o dia 18 de junho de 2019 a 01 de julho de 2019, apresentado na figura 38, que demonstra uma boa concordância.

Para o período de inverno, o modelo apresentou um erro absoluto médio percentual de 2% (erro médio absoluto, MAE, de 0,017 °C), representando uma ótima concordância entre os valores.

FIGURA 38 - Valores de temperatura medida e calculada no Canal do Palmital entre os dias 18 de junho de 2019 a 01 de julho de 2019.



Fonte: A autora. 2021

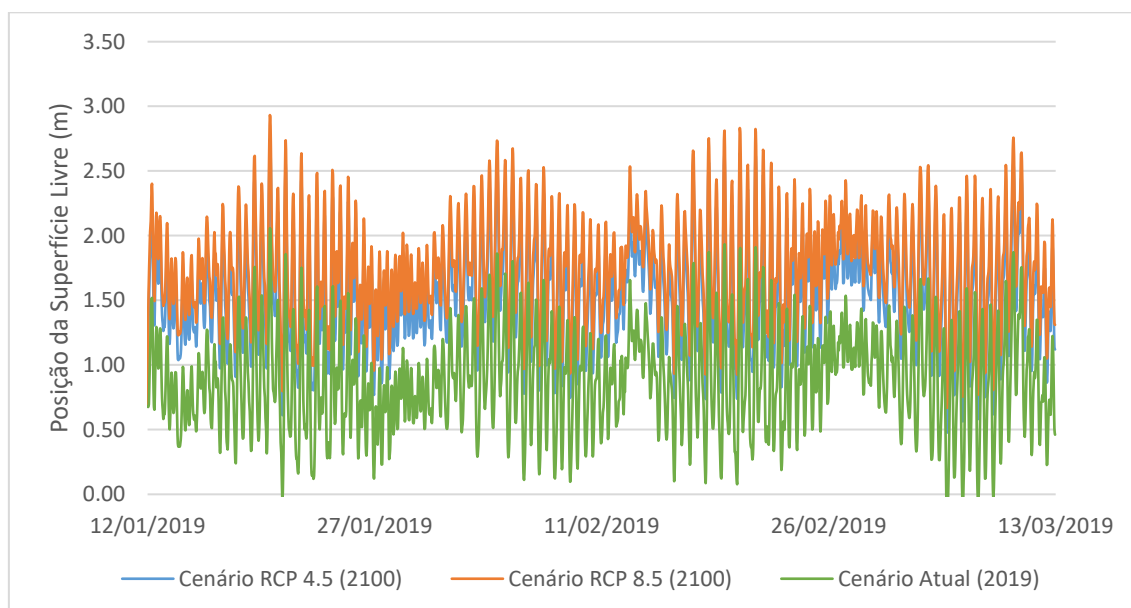
#### 4.3 HIDRODINÂMICA EM CÊNARIOS DE MUDANÇA CLIMÁTICAS

Nas simulações para os cenários de mudanças climáticas, utilizou-se o modelo geométrico (malha, batimetria e amplitude da rugosidade de fundo), os dados de vento e as vazões fluviais correspondentes aos períodos de verão e inverno de 2019, usados nas simulações para calibrar e validar o modelo, modificando apenas a condição de contorno na fronteira aberta. Na fronteira aberta foram especificadas as curvas de maré medidas para o verão e inverno de 2019, somada a variação do nível médio do mar, estimada pelo SMC. Usando a escala regional, para o ano de 2100, a elevação do nível médio do mar prevista é de 0,67 metros, para o cenário intermediário (RCP 4.5), e de 0,82 metros, para o pior cenário (RCP 8.5).

Nos períodos simulados, verão e inverno, a preamar de sizígia atinge o valor máximo de 3,10 metros na estação de Joinville, para o cenário de RCP 8.5, e 2,92 metros para o cenário de RCP 4.5; para o ano de 2019, este valor é 2,21 metros. Para as estações de São Francisco – Tesc II e o Porto de Itapoá, os valores da preamar de sizígia são respectivamente de 2,98 e 2,93 metros, para o cenário de RCP 8.5, e de 2,80 e 2,75 metros para o cenário RCP 4.5; para o ano de 2019, este valor é de 2,10 e 2,06 metros. Certamente este aumento nos níveis das preamares de sizígia poderá acarretar inundações.

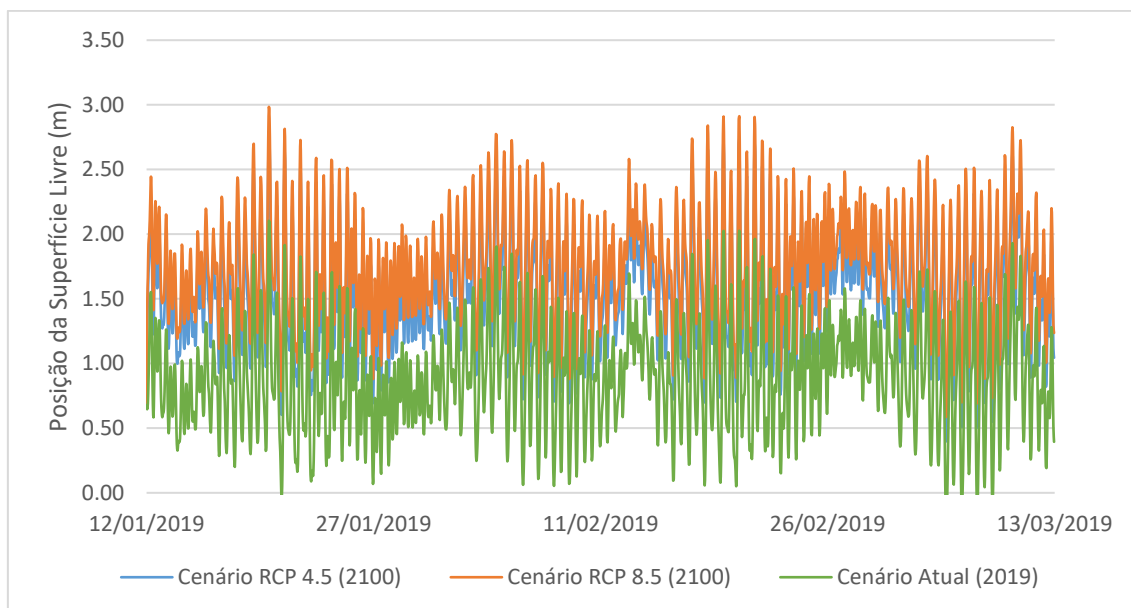
As figuras 39, 40 e 41 mostram os valores da variação da posição da superfície livre para o verão de 2019 e para o ano de 2100, os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. É possível observar que para os cenários futuros a variação da posição da superfície livre manteve a mesma fase e amplitude, apenas sendo elevado o nível médio do mar.

FIGURA 39 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa do Porto de Itapoá para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



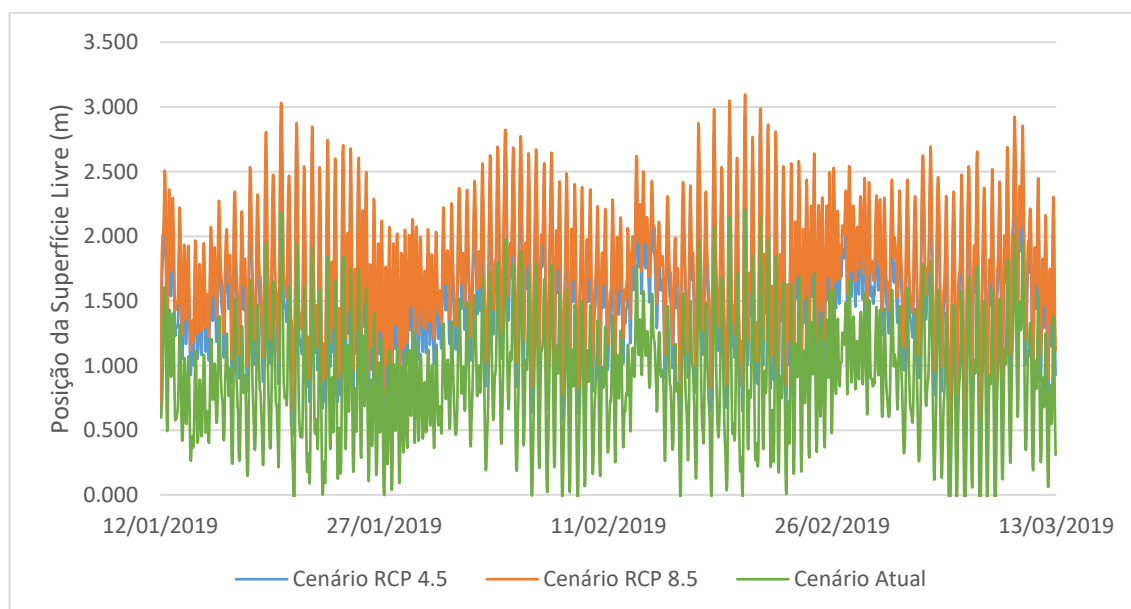
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 40 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa de São Francisco – TESC II para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 41 - Valores da posição da superfície livre na estação marégrafa de late Clube de Joinville para os cenários de verão de 2019, e para ano de 2100, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5



Fonte: A autora. 2021



As figuras 42 e 43 ilustram o campo de correntes no período de sizígia, que corresponde aos instantes de meia maré enchente, preamar, meia maré vazante e baixa-mar na baía da Babitonga, durante o verão, no dia 20/01/2019, e o inverno, no dia 05/05/2019, respectivamente.

É possível observar que as regiões da entrada do canal principal da baía da Babitonga apresentam maiores velocidades que as regiões internas da baía. A região do Canal do Palmital também apresenta variações do módulo de velocidades significativas relacionadas a influência da entrada e saída da maré. Ao comparar as figuras 42 e 43, é possível verificar que o período de inverno apresentou velocidades instantâneas superiores às apresentadas para o período de verão.

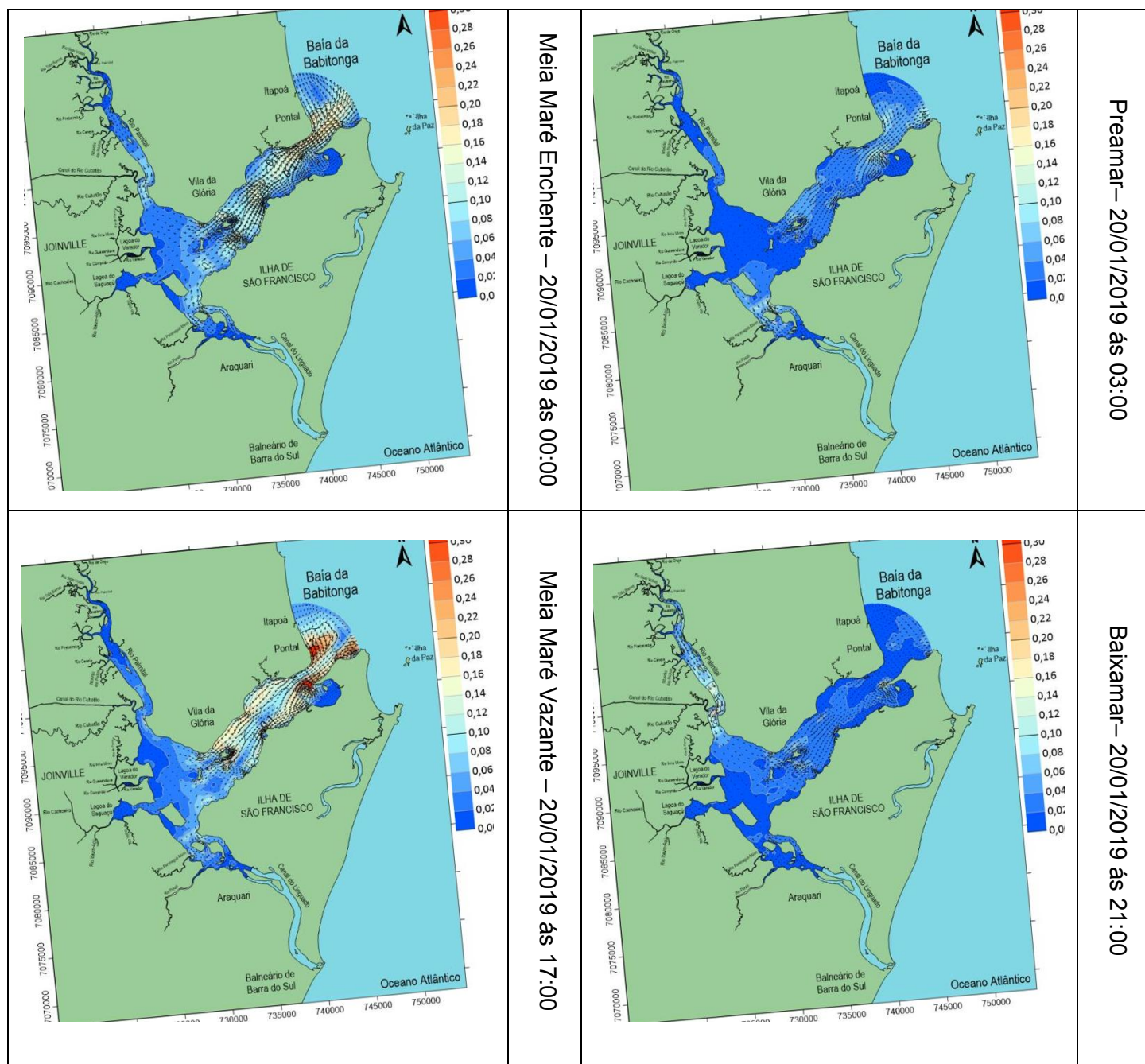
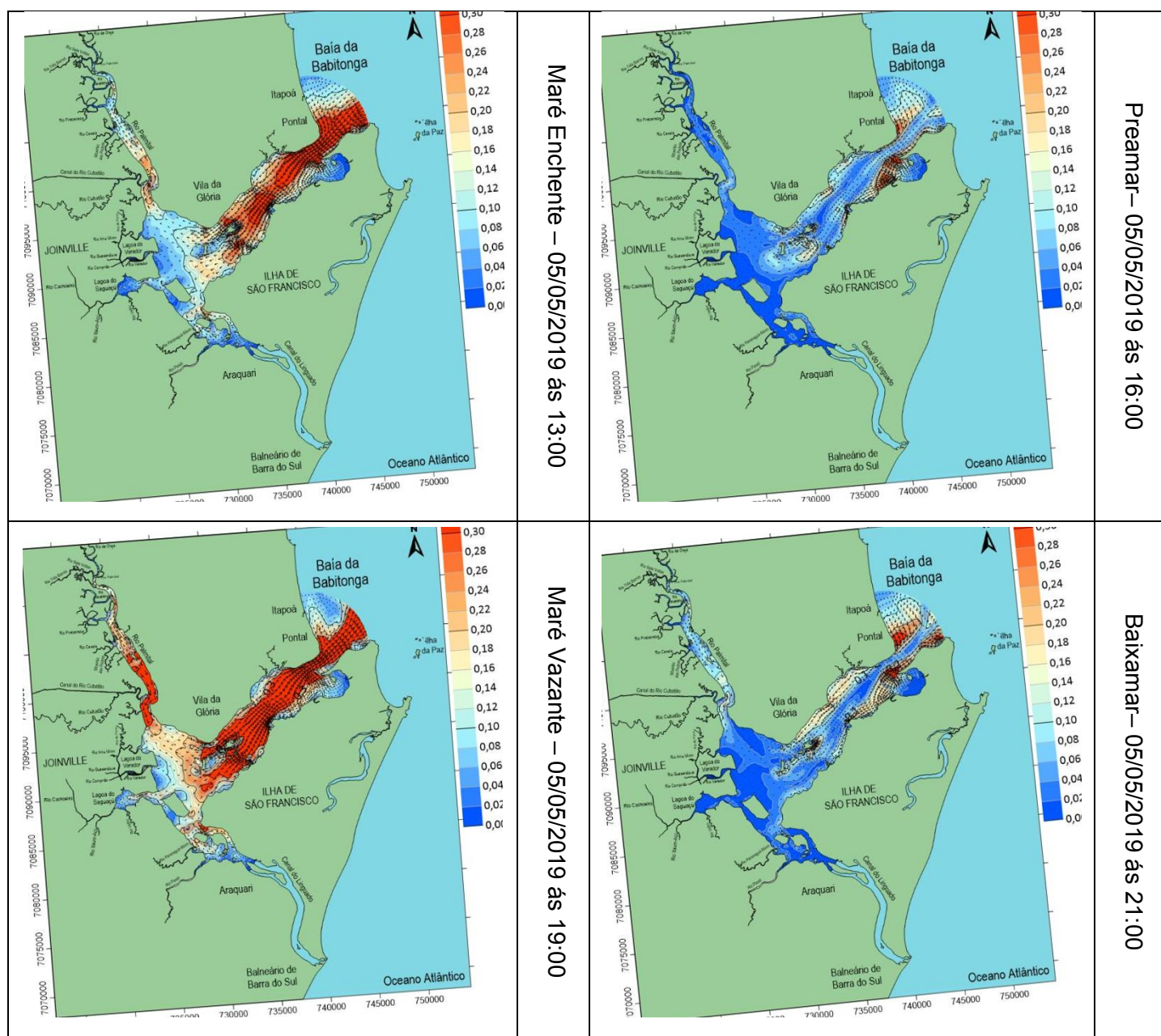


FIGURA 43 - Módulo da velocidade para um ciclo de maré de sizigia, contemplando maré de enchente, preamar, maré vazante e baixamar, para o dia 05 de maio de 2019, período de inverno.



A figura 44 apresenta as isolinhas de ocorrência de velocidades de corrente acima de 0,30 m/s para o período de verão de 2019, 2100 com RCP 4.5 e RCP 8.5. Assim como a figura 45, a mesma probabilidade de ocorrência para o período de inverno de 2019, de 2100 com RCP 4.5 e de 2100 com RCP 8.5.

O fundo da baía apresenta praticamente todo o tempo velocidades abaixo de 0,3 m/s, demonstrando que esta região é propensa ao acúmulo de poluentes.

A região próxima à entrada da baía e o canal principal apresentam, na metade do tempo, velocidades maiores que 0,3 m/s, caracterizando uma região com troca de massa d'água significativa. A região do Canal do Palmital, próximo ao rio Cubatão, também apresentam ocorrências de velocidades superiores a 0,3 m/s, tanto para o período de verão como para o inverno, em todos os cenários. Comparando os três cenários, entre verão e inverno observa-se que não há diferenças significativas relacionadas à sazonalidade no estuário, exceto na região do canal Palmital, que tem uma intensificação nos valores de velocidade.

É possível observar que tanto para o período de inverno quanto de verão, em cenários de aumento do nível médio do mar, as velocidades, principalmente na entrada do canal principal, são menores comparadas aos cenários de 2019. Essa diferença é mais fácil de visualizar com os dados de inverno que aparentam uma maior diferença de velocidade.



FIGURA 44 – Isolinhas de ocorrência de velocidades de corrente acima de 0,30 m/s, para o verão de 2019, e os cenários de verão de 2100, com variação correspondente a RCP 4.5 e RCP8.5.

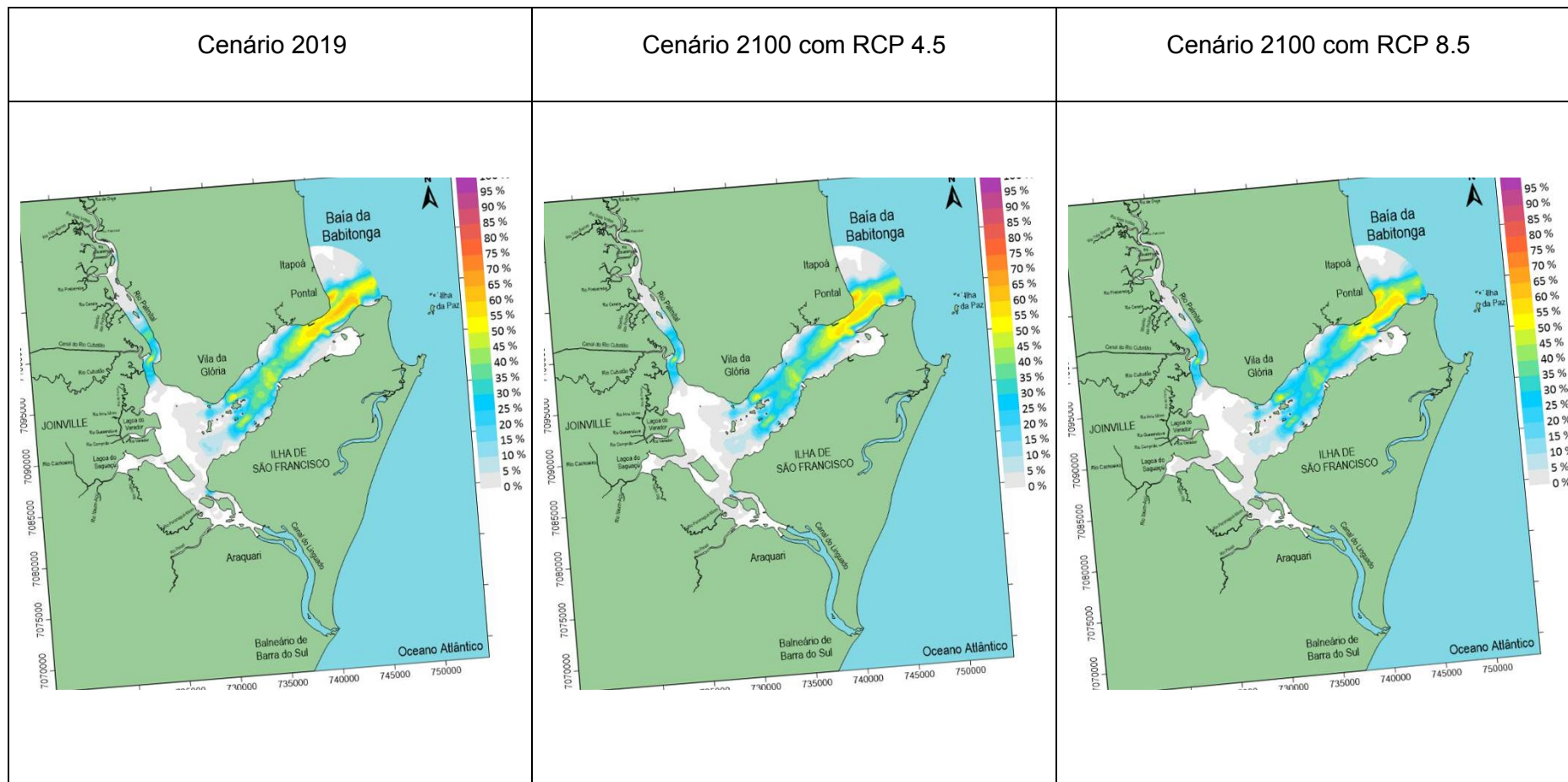
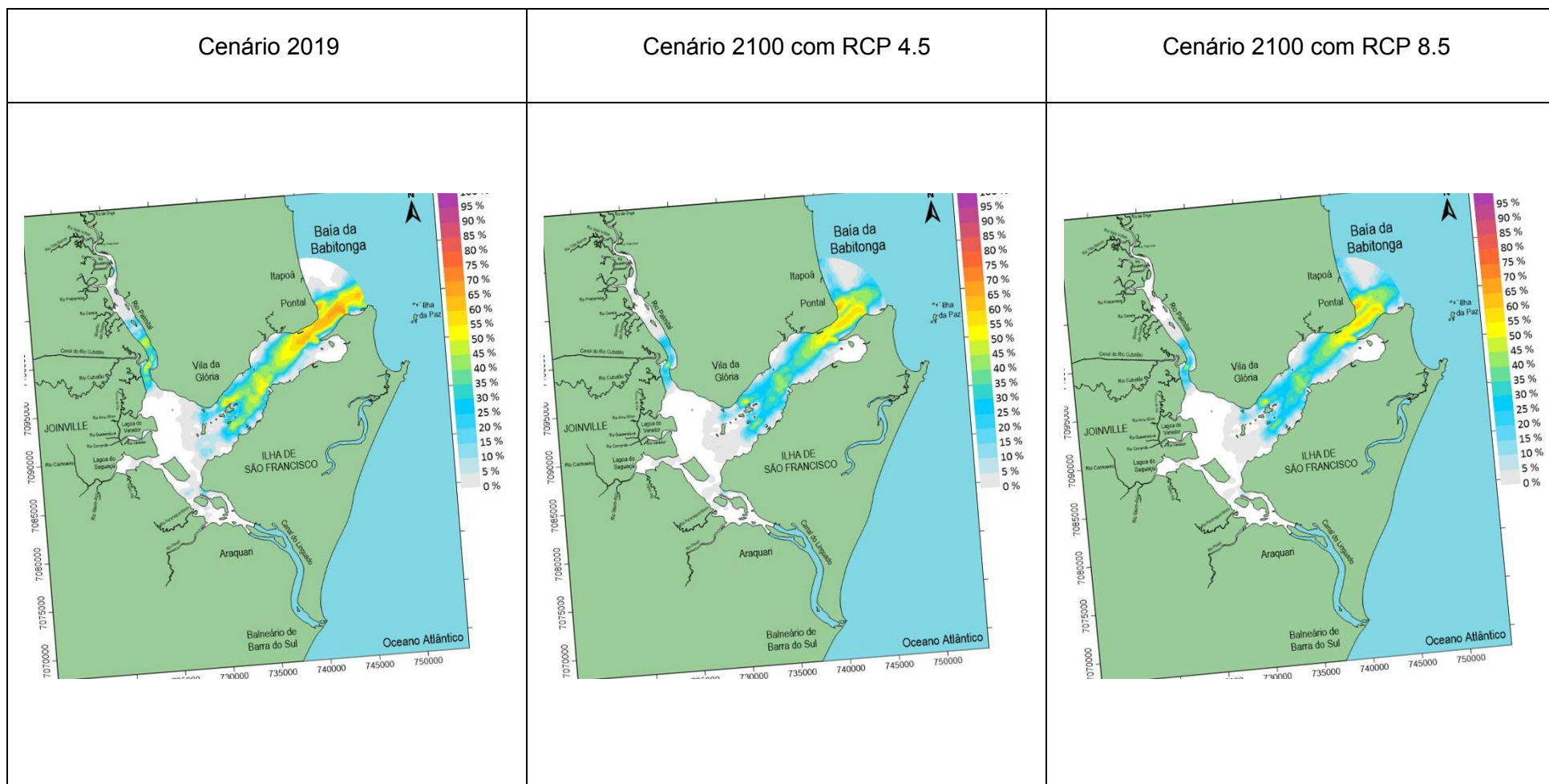


FIGURA 45 - Isolinhas de ocorrência de velocidades de corrente acima de 0,30 m/s, para o inverno de 2019, e os cenários de inverno de 2100, com variação correspondente a RCP 4.5 e RCP8.5.



#### 4.4 INDICADORES DE MISTURA

São apresentados, nesta seção, os valores de Taxa de Renovação e da Idade da Água, calculados usando o modelo de transporte Euleriano do SisBaHiA®. Este modelo usa a mesma grade espacial aplicada ao modelo hidrodinâmico e permite o uso de diferentes comprimentos de intervalos de tempo nas análises. A vantagem de acoplar os dois modelos surge na determinação das velocidades de correntes e dos coeficientes de turbulência, o que é feito previamente no modelo hidrodinâmico, que é usado diretamente no modelo de transporte Euleriano. Sendo assim, as simulações foram desenvolvidas para os mesmos períodos previamente simulados pelo modelo hidrodinâmico: ano de 2019, períodos de verão e inverno, e ano de 2100, cenários RCP 4.5 e 8.5, períodos de verão e inverno.

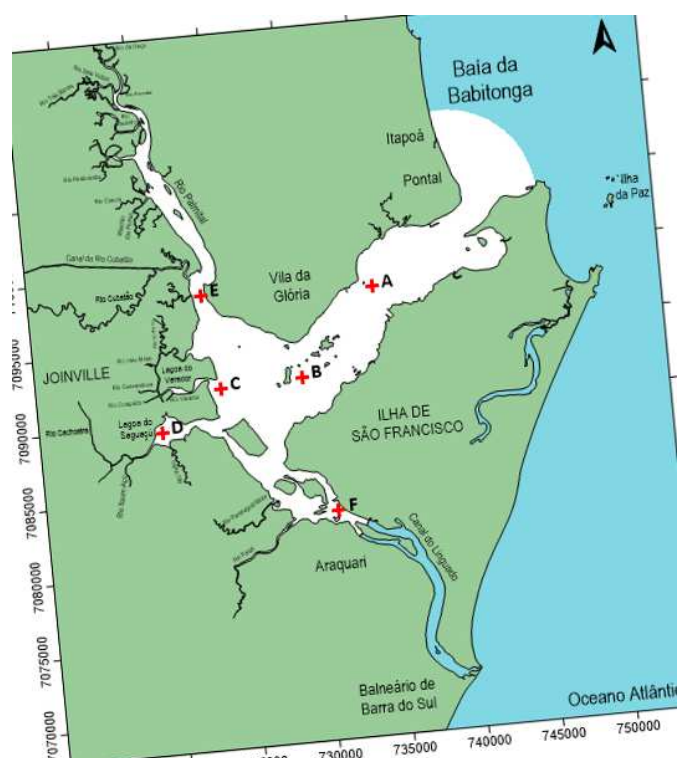
Os resultados são apresentados para as estações listadas na tabela 12 e indicadas na figura 46, que caracterizam diferentes compartimentos da baía. A estação A, no meio do canal principal de acesso aos terminais portuários na baía da Babitonga, caracteriza a região de maior troca; a estação B, próximo à Ilha Grande e a rota do *ferry boat* que liga a Vila da Glória ao centro histórico de São Francisco do Sul, apresenta velocidades baixas. A estação C, localizada na região central da baía, e a estação D, dentro da Lagoa do Saguazu, representam as regiões com velocidades reduzidas. A estação E, no Canal do Palmital, próxima à foz dos principais afluentes da baía da Babitonga, e a estação F, no Canal do Linguado, que foi fechado na década de 30, para a construção da rodovia que interliga a região de Barra do Sul com São Francisco do Sul, são os locais mais críticos em relação às trocas de massas d'água.

TABELA 12 - Estações para análise da taxa de renovação e idade da água para os cenários atuais e de mudanças climáticas.

ESTAÇÃO	LOCAL	COORDENADA X	COORDENADA Y
A	Meio do Canal Principal	734826.44	7097230.19
B	Ilha Grande	729818.68	7091895.44
C	Centro Oeste	724569.77	7091644.31
D	Lagoa do Saguacú	720641.13	7089196.3
E	Canal do Palmital	723824.25	7097688.83
F	Canal do Linguado	731342.22	7083226.87

Fonte: A autora. 2021

FIGURA 46 - Indicação dos locais de análise da taxa de renovação e idade da água na baía da Babitonga.



Fonte: A autora. 2021

#### 4.4.1 Cenário de 2019

- Taxa de Renovação:**

A figura 47 mostra a evolução temporal dos valores das taxas de renovação para as estações A, B, C, D, E e F, durante 105 dias, no verão de 2019. As regiões em que estão localizadas as estações A e E, sofrem grandes oscilações, influência da fronteira aberta e das vazões fluviais. As estações B, C,



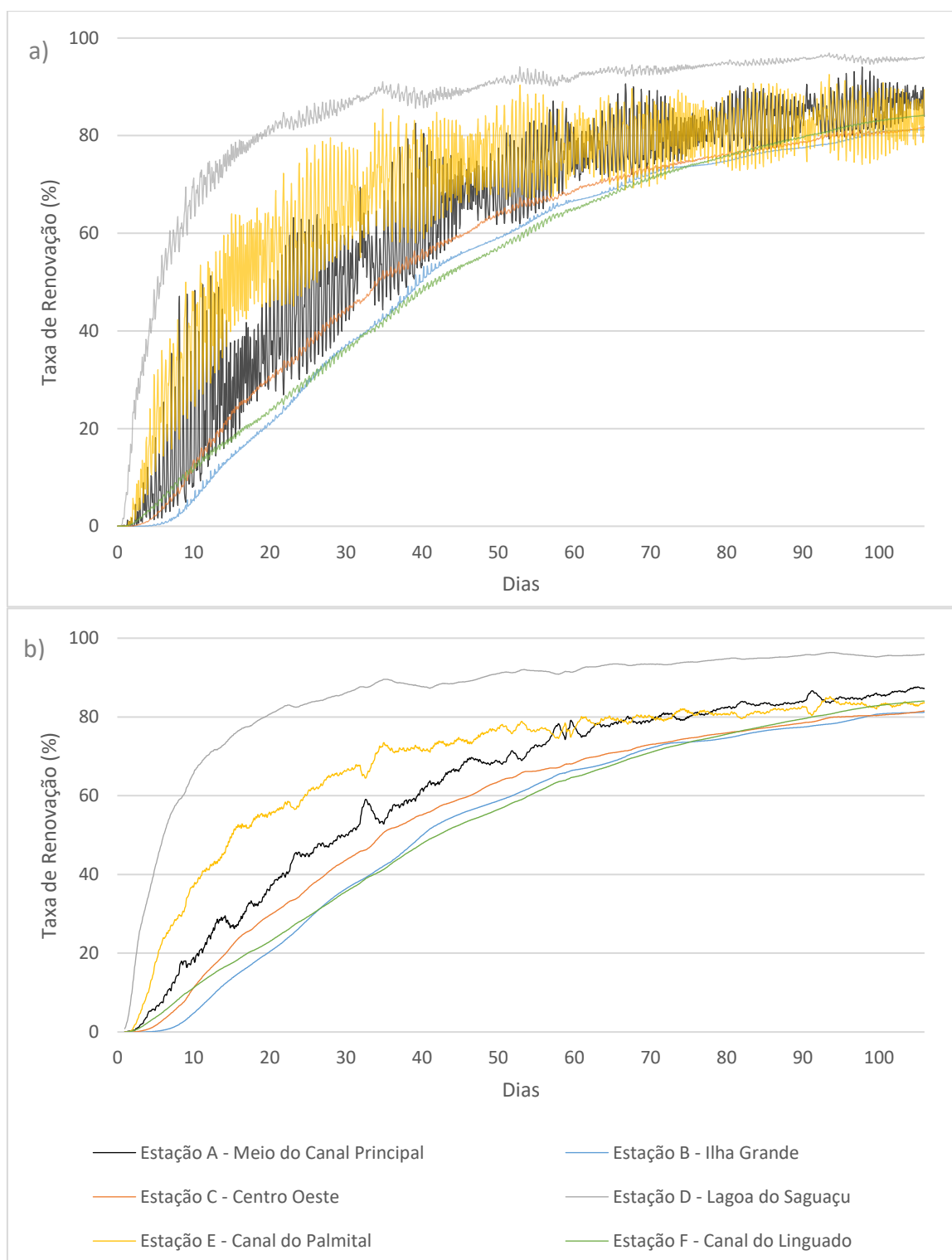
D e F, na região da Ilha Grande, no fundo da baía, na Lagoa de Saguaçu e no Canal do Linguado, respectivamente, apresentam pouca oscilação. As estações B, C e F são as que mostraram as menores taxas de renovação. O canal do Linguado possui baixas taxas de renovação por conta de sua localização, em uma região com baixas velocidades.

As maiores taxas de renovação foram observadas na Lagoa do Saguaçu, Estação D, certamente devido à influência dos rios que desembocam próximo ao ponto; em 20 dias já apresenta 80% de sua água renovada. Na estação E, no Canal do Palmital, este tempo é de cerca de 40 dias, na estação A (no meio da Baía), 51 dias, e nas regiões do Canal do Linguado (estação F) e da Ilha Grande (estação B), aproximadamente 90 dias para alcançar a mesma taxa de renovação. É possível notar a influência da maré tanto na estação do Canal do Palmital, como no meio do canal principal, impondo oscilação nos valores da taxa de renovação; as oscilações no inverno são menores, devido às vazões fluviais diminuem cerca de um terço das vazões existentes na época do verão.

Para o período de inverno de 2019 (figura 48), a estabilização da taxa de renovação é mais demorada, principalmente para as estações próximas às embocaduras dos rios; a estação localizada na região da Lagoa do Saguaçu continua apresentando a maior renovação. Desta vez, a taxa de 80% nesta região foi atingida após 42 dias de simulação, seguido pelo Canal do Palmital, 60 dias. Já a região do Canal do Linguado é encontrada a menor taxa de renovação, que precisa cerca de 91 dias para obter a mesma quantia de água “nova”.

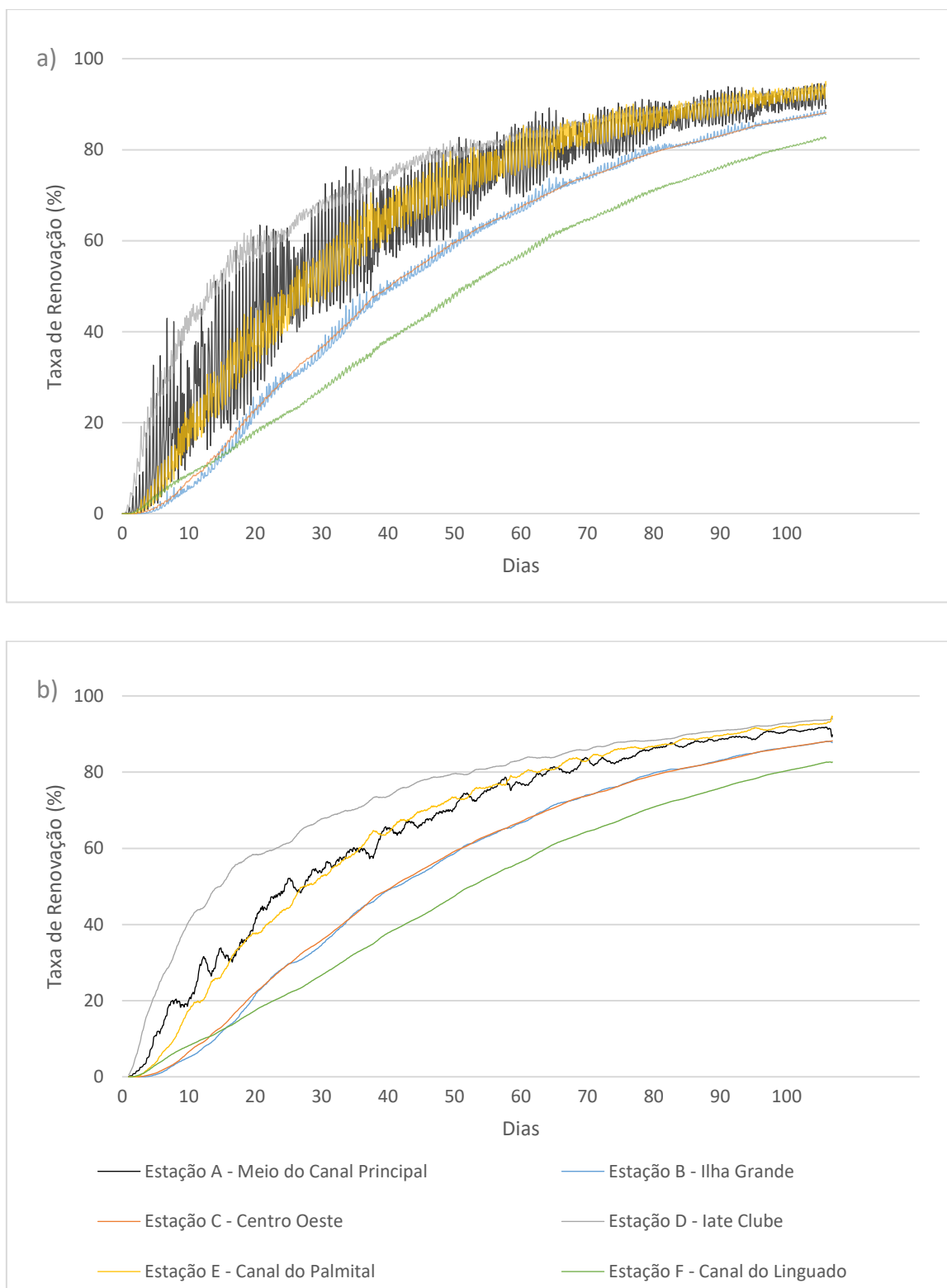
Apesar das taxas de renovação para o período de inverno demorarem mais para estabilizar, a quantidade de água renovada é maior ao final da simulação, exceto na Lagoa do Saguaçu. Essas diferenças sazonais indicam a influência da vazão fluvial nos processos de mistura, com o período de verão apresentando as maiores vazões fluvial, além de maiores incidências de marés meteorológicas, comparadas com o período de inverno.

Figura 47 –a) Taxa de Renovação e b) Média Móvel de 24 horas da Taxa de Renovação nas estações A, B, C, D, E e F para o período de verão de 2019.



Fonte: A autora. 2021

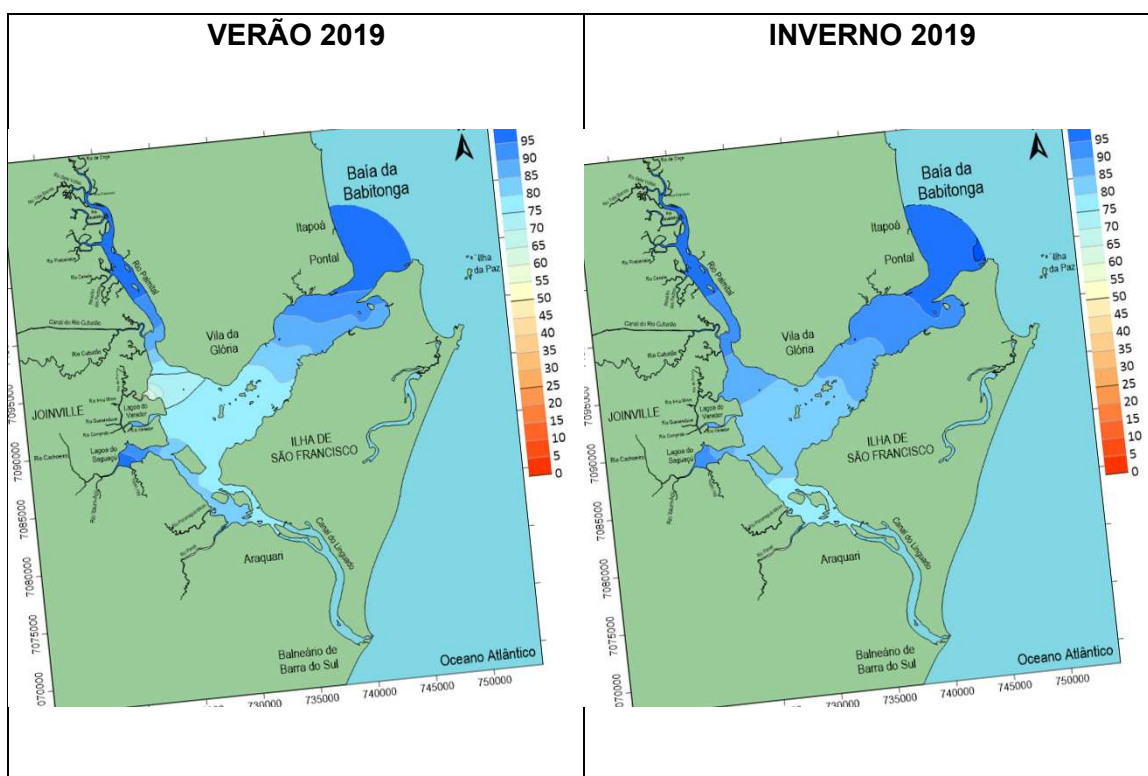
Figura 48 a) Taxa de Renovação e b) Média Móvel de 24 horas da Taxa de Renovação nas estações A, B, C, D, E e F para o período de inverno de 2019.



Fonte: A autora. 2021

Observando as isolinhas da Taxa de Renovação ao final do período de simulação, no instante de preamar, figura 49, nota-se uma região que possui menor taxa de renovação no meio da baía. Essa região pode ser considerada um local de Zona de Mistura, pois recebe tanto influência da maré quanto dos rios.

FIGURA 49 – Isolinhas de Taxa de Renovação, em %, na baía da Babitonga para os períodos de inverno e verão de 2019.



Fonte: A autora. 2021

### • Idade da Água

A Idade da Água em baías e estuários indica o tempo gasto para que constituintes presentes na água (sais, poluentes, etc.) deixem a região de interesse, sendo possível observar as variações espaciais e temporais em relação aos forçantes e a sua morfologia. No instante inicial, admite-se para toda a região de interesse, uma concentração inicial igual a 1 da substância que sofrerá decaimento e, conseqüentemente, a idade da água é igual a 0 em todo o domínio. As águas novas que entram pelos rios afluentes e pela fronteira aberta de mar também possuem concentração igual a 1, com idade da água igual a 0. À

medida que as águas iniciais e as águas novas, ambas com  $IA = 0$ , foram se misturando, advectadas e difundidas, a concentração da substância decai de acordo com a taxa de decaimento utilizada, e o valor se torna diferente dentro do domínio estudado.

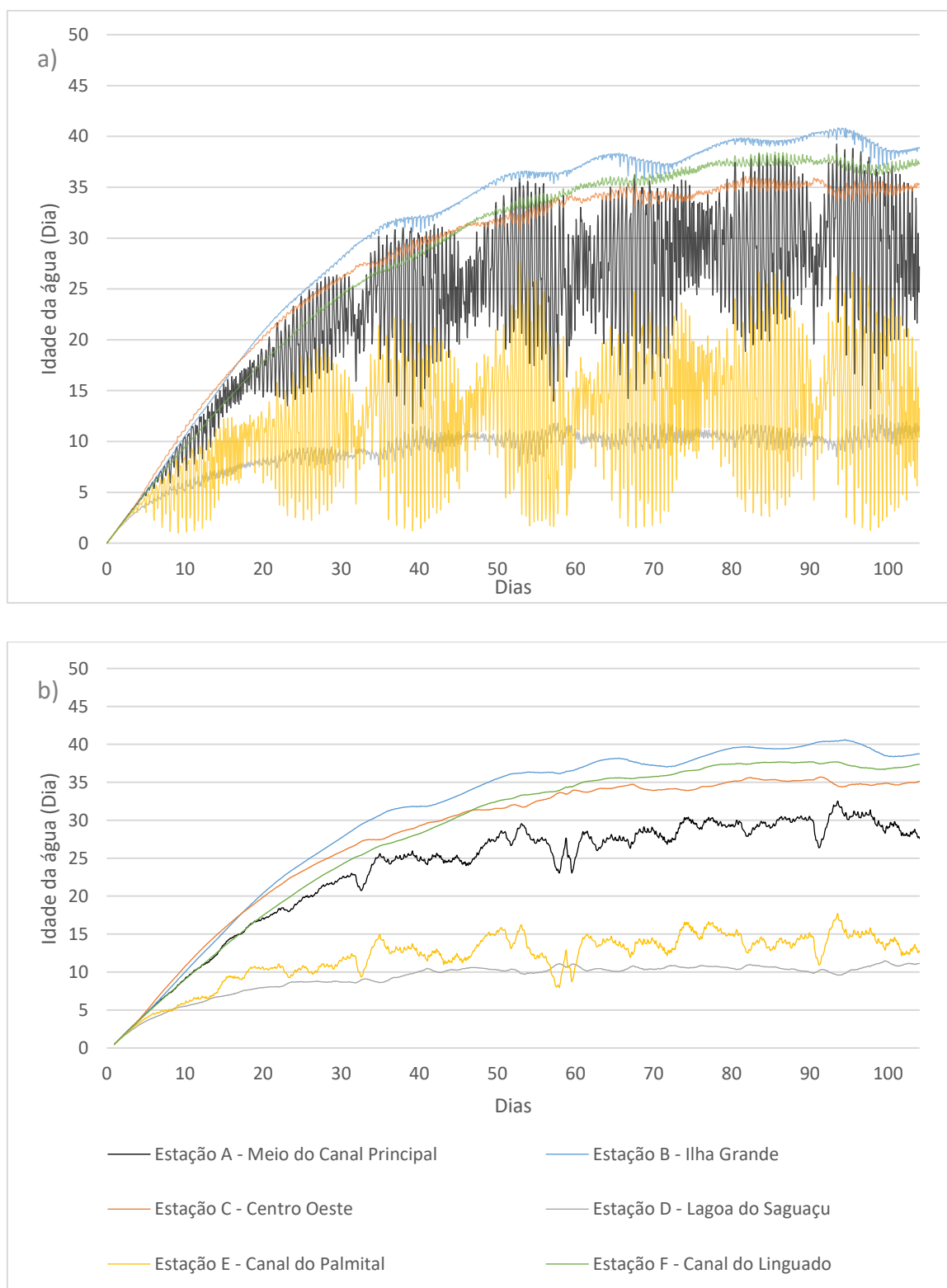
Observando os resultados obtidos para o verão de 2019, nota-se que as regiões próximas às cabeceiras dos rios (Estações D e E) e a região do canal principal (Estação A) apresentam águas mais novas; estas estações também possuem as maiores taxas de renovação. É possível observar também que, para o período de verão, a renovação é mais intensa que a observada no inverno.

A região da Ilha Grande, estação B, é a porção mais estagnada da baía da Babitonga no verão; no inverno, a região mais estagnada é a região do Canal do Linguado. Certamente esta diferença está relacionada às variações observadas nas vazões fluviais.

As figuras 50 a) e 51 a) mostram a evolução temporal da idade da água, em dias, para o verão e inverno respectivamente, para as estações A, B, C, D, E e F em um período de 105 dias. É possível observar que tanto para o período de verão quanto inverno as estações A e E são as que sofrem maiores oscilações, enquanto as estações B, C, D e F apresentam pouca oscilação. Há também uma grande diferença de oscilação no Canal do Palmital relacionado a sazonalidade, em que é possível visualizar na figura 51 menor oscilação no período de inverno, devido às vazões fluviais serem menores.

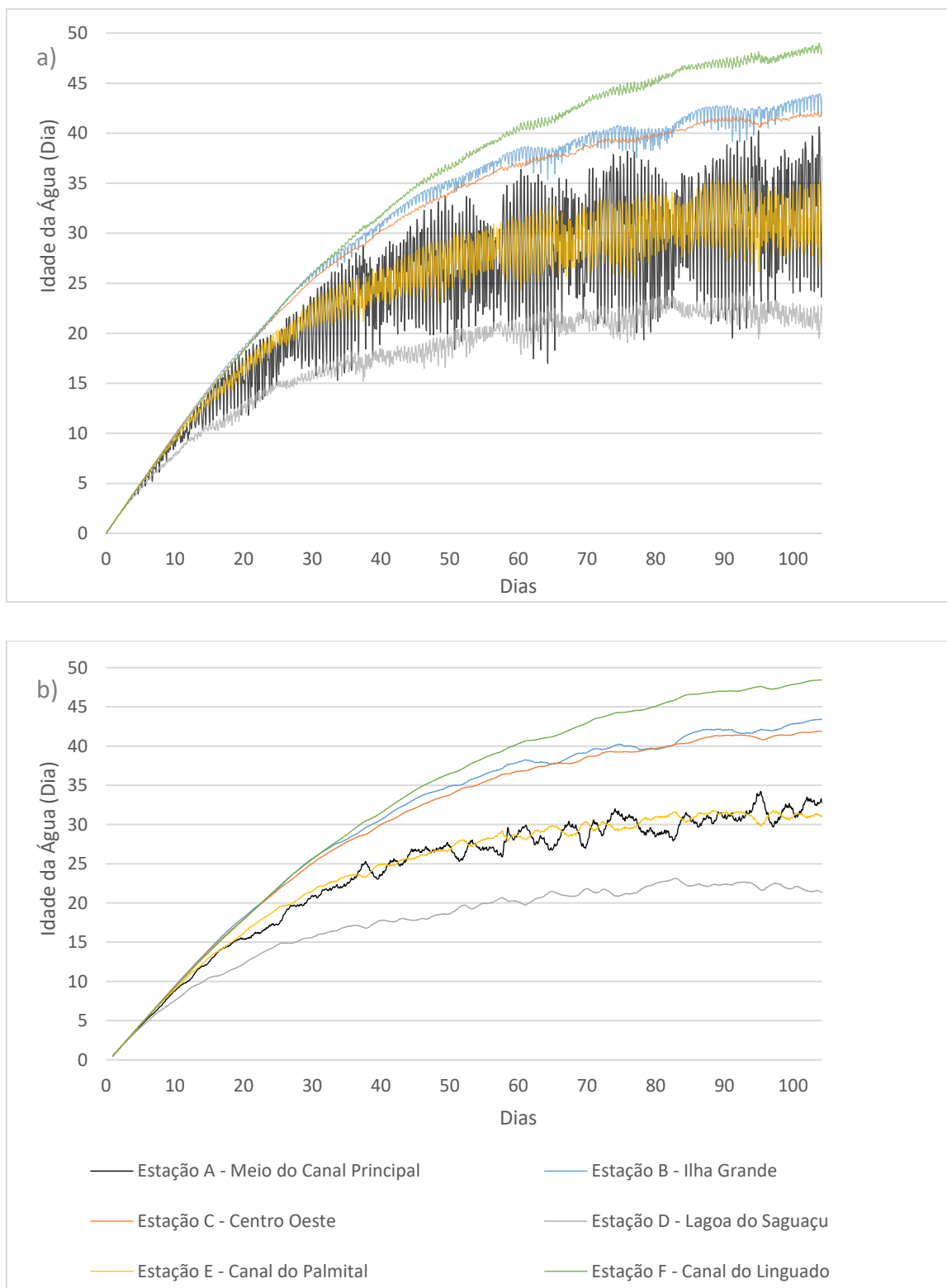
A estação D, localizada na Lagoa do Saguacú é a que se estabiliza mais rapidamente. As estações B, C e F são as que apresentam maiores idades da água. O período de verão apresentou a maior idade da água para a estação B, na Ilha Grande, local que possivelmente é a região de Zona de Mistura do estuário, enquanto para o período de inverno a maior idade da água é observada na estação do Canal do Palmital.

FIGURA 50 - a) Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo e b) Média Móvel de 24 horas da Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo para o período de verão de 2019, nas estações A, B, C, D, E e F.



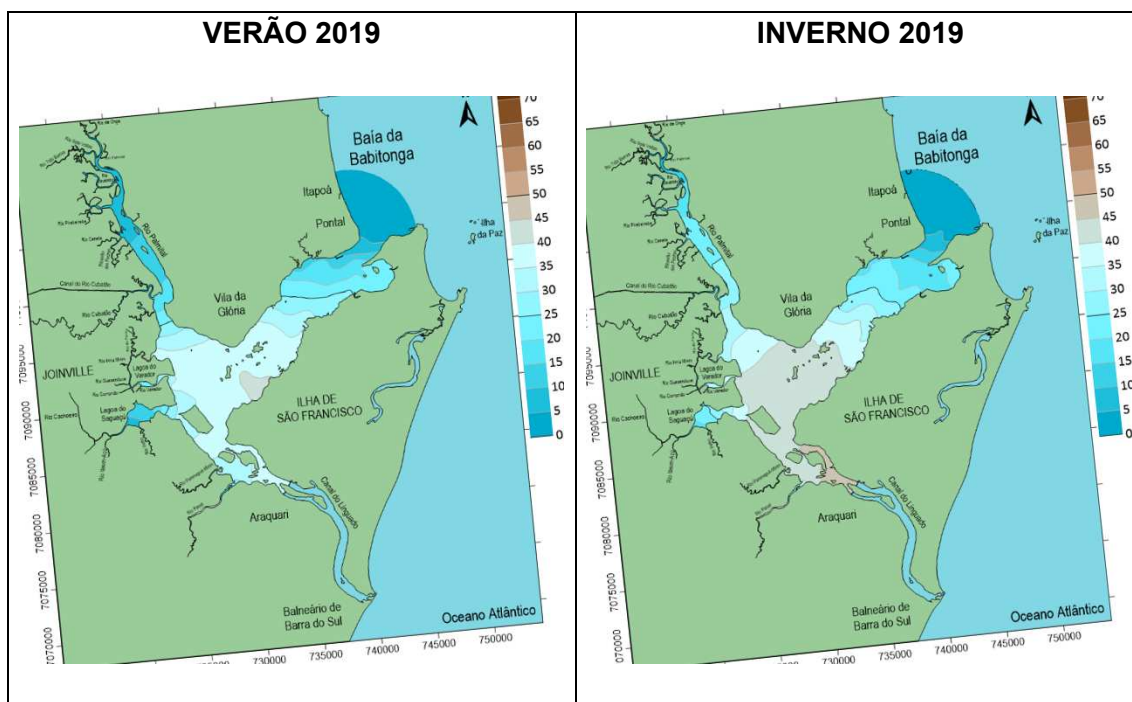
Fonte: A autora. 2021

FIGURA 51 - a) Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo e b) Média Móvel de 24 horas da Concentração da substância marcadora de idade pelo tempo para o período de inverno de 2019, nas estações A, B, C, D, E e F.



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 52- Isolinhas de Idade da água da baía da Babitonga para o período de verão e inverno de 2019 para 90 dias de simulação



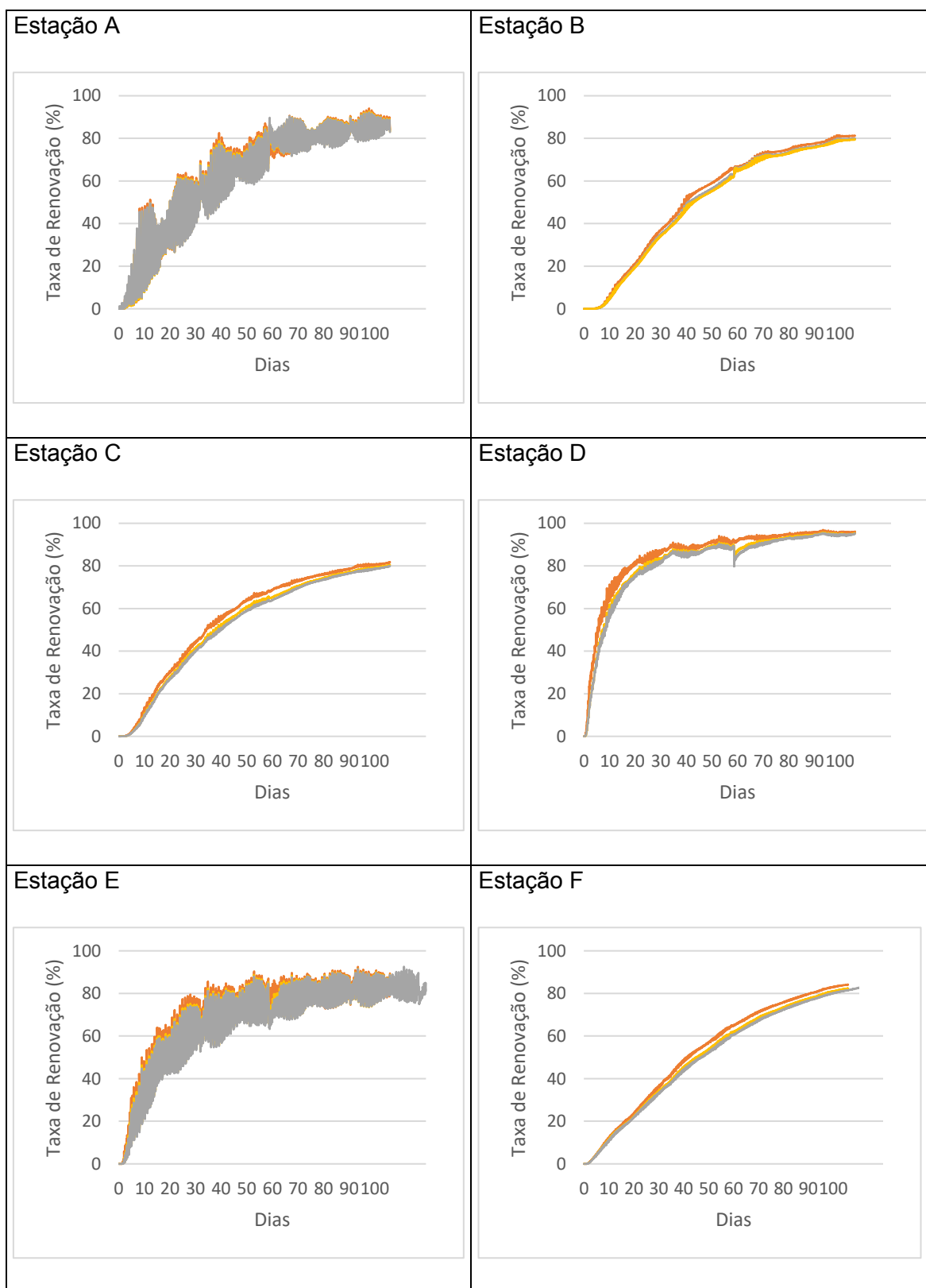
#### 4.5 ÍNDICES DE MISTURA PARA O CENÁRIO 2019, CENÁRIO DE 2100 COM RCP 4.5 E CENÁRIO DE 2100 COM RCP 8.5

É possível comparar os índices de mistura entre os diferentes cenários simulados. As figuras 53 e 54 mostram a comparação entre os cenários de 2019, de 2100 com RCP 4.5 e de 2100 com RCP 8.5, da taxa de renovação para os períodos de verão e inverno em cada uma das estações, respectivamente. É possível observar que, para todos os cenários, as estações A e E foram as que apresentaram maiores oscilações, enquanto as outras estações apresentaram poucas oscilações. As oscilações vistas para a estação A são devido ao efeito da maré, enquanto a estação E são influenciadas pelo efeito da vazão do rio Cubatão.

É possível notar, também, que conforme o nível do mar é elevado, há uma redução da taxa de renovação, principalmente no período de inverno em que essa diferença entre os cenários é mais notória. A idade da água é inversamente proporcional à taxa de renovação, portanto irá apresentar um aumento mais significativo entre os cenários para o período de inverno.

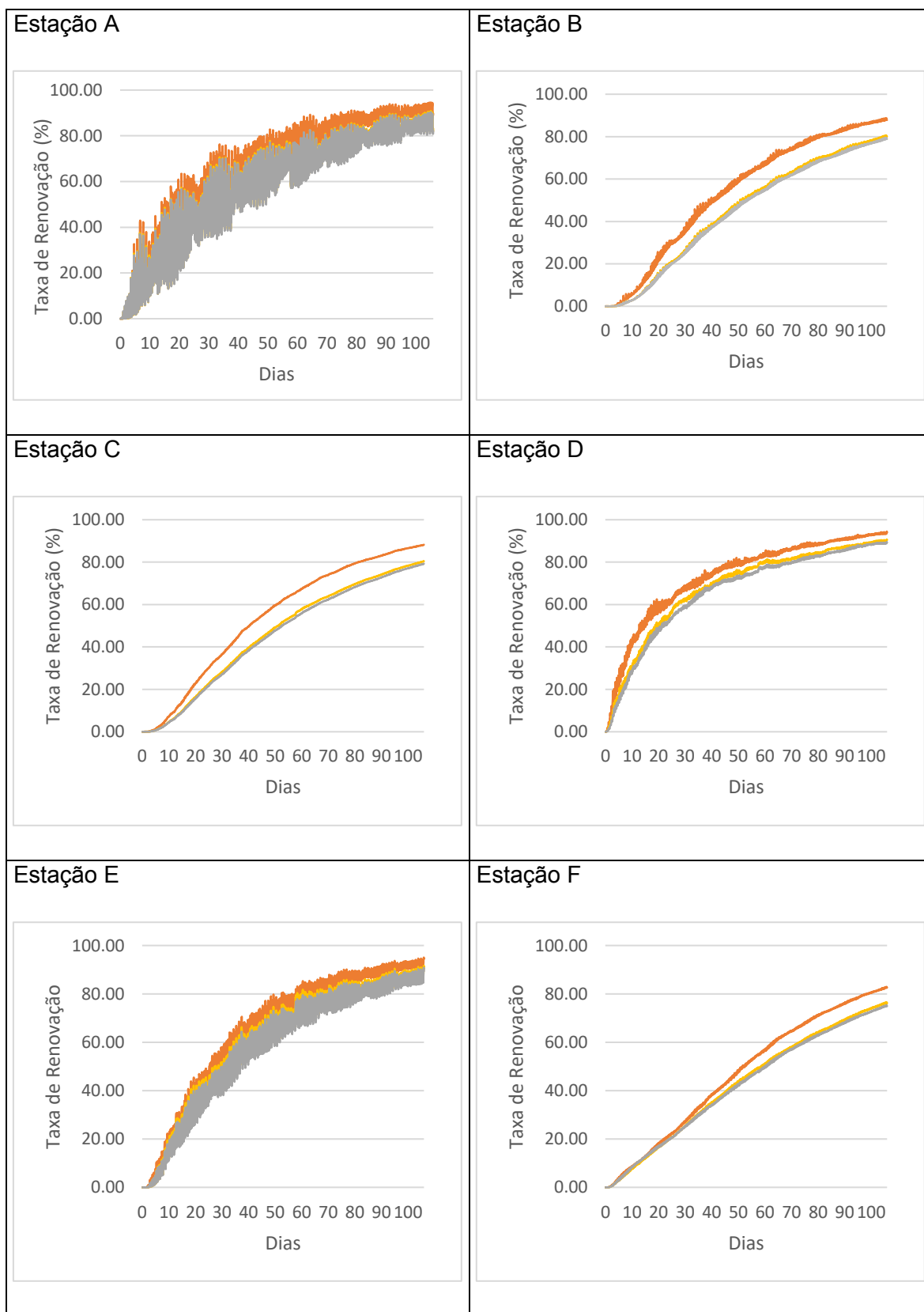


FIGURA 53 - Comparação entre as taxas de renovação do período de verão para os cenários de 2019 (laranja), RCP 4.5 (amarelo) e RCP 8.5 (cinza).



Fonte: A autora. 2021

FIGURA 54 - Comparação entre as taxas de renovação do período de inverno para os cenários de 2019 (laranja), RCP 4.5 (amarelo) e RCP 8.5 (cinza)



Fonte: A autora. 2021

Com os resultados foi possível observar que as estações B e F são as mais críticas para todos os cenários possuindo as menores taxas de renovação e maiores idade da água. Enquanto a estação D, tanto para o verão como para o inverno, para todos os cenários apresenta a melhor taxa de renovação e menor idade da água. Ao observar os resultados obtidos na tabela 13 e 14 que apresentam os valores de taxa de renovação e idade da água, respectivamente, para todos os cenários tanto para verão quanto para o inverno, foi possível observar que a menor taxa de renovação e maior idade da água apresentada é para o período de inverno no cenário 2100 com RCP 8.5 na estação F. Enquanto a maior taxa de renovação e idade da água foi obtida para o período de verão de 2019 na estação D.

As tabelas 13 e 14 mostram os valores resultantes de taxa de renovação e idade da água respectivamente para cada cenário e estação. Note que a redução média da taxa de renovação para as estações foi de 1,71% para o período de verão e 8,16% para o período de inverno, enquanto a idade da água houve um aumento médio de 2,36 dias para o verão e de 6,69 dias para o inverno entre os cenários de 2019 e 2100 com RCP 8.5.

Neste estudo, considerando apenas o efeito da elevação do nível médio do mar para cenários futuros, foi verificado uma redução, no período de inverno de 8,01% nas taxas de renovação e um aumento de quase 4 dias na idade da água entre os cenários de inverno de 2019 e o cenário estimado de 2100 com RCP 8.5.

TABELA 13- Valores de taxa de renovação para as estações A, B, C, D, E e F para os períodos de inverno e verão para os diferentes cenários de 2019, 2100 com RCP 4.5 e 2100 com RCP8.5, com destaque para a maior e menor taxa de renovação.

	Verão			Inverno		
	2019	RCP 4.5	RCP 8.5	2019	RCP 4.5	RCP 8.5
<b>Estação A</b>	85.90	85.27	84.84	87.68	79.84	78.99
<b>Estação B</b>	77.50	76.20	75.67	82.95	73.69	72.50
<b>Estação C</b>	78.55	77.10	76.46	83.12	74.19	72.83
<b>Estação D</b>	<b>95.85</b>	94.70	94.33	91.08	87.35	85.82
<b>Estação E</b>	86.44	85.86	85.79	90.29	85.07	84.04
<b>Estação F</b>	79.73	77.60	76.61	76.01	69.14	<b>68.00</b>

Fonte: A autora. 2021

TABELA 14 - Valores de idade da água para as estações A, B, C, D, E e F para os períodos de inverno e verão para os diferentes cenários de 2019, 2100 com RCP 4.5 e 2100 com RCP8.5, com destaque para a maior e menor idade da água.

	Verão			Inverno		
	2019	RCP 4.5	RCP 8.5	2019	RCP 4.5	RCP 8.5
<b>Estação A</b>	27.35	27.92	28.43	33.32	40.96	41.52
<b>Estação B</b>	40.23	41.69	42.22	42.65	49.84	50.46
<b>Estação C</b>	35.46	37.39	38.25	41.22	47.87	48.92
<b>Estação D</b>	<b>9.87</b>	12.29	12.77	22.09	27.29	29.15
<b>Estação E</b>	18.05	20.55	20.92	30.70	35.24	36.18
<b>Estação F</b>	37.59	39.41	40.15	47.08	50.15	<b>51.00</b>

Fonte: A autora. 2021

É possível comparar os índices de mistura entre os diferentes cenários simulados. A principal evidência é que ocorre uma redução da taxa de renovação para o ano de 2100, nos dois cenários e, consequentemente, um aumento da idade da água à medida que o nível médio do mar é modificado. Apesar de haver um aumento das velocidades de corrente, conforme exemplificado nas figuras 55, 56, 57 e 58 há também um aumento do volume de água a ser renovado, fazendo com que as taxas de renovação sejam reduzidas.

Esses cenários de redução das taxas de renovação se intensificam para o período de inverno, consequência das menores vazões fluviais deste período, principalmente nos locais que demonstraram maior estagnação das parcelas de água com menores taxas de renovação e idade da água. As figuras 55 e 56 mostram a comparação entre os cenários para os períodos de verão e inverno da taxa de renovação, em que é possível observar, principalmente na figura 56, uma redução da taxa de renovação entre os cenários.

A região do Canal do Linguado, identificada como uma das regiões mais críticas em relação aos processos de mistura, pela pouca influência de vazões fluviais na região, tem potencial para tornar o local onde ocorre os piores índices de mistura, possivelmente afetando a qualidade da água da região. Essa região tem sido o foco principal dos estudos e projetos na baía da Babitonga, para a reabertura do canal, que deve ser avaliado principalmente devido à projeção de cenários futuros com elevação do nível médio do mar, que poderá reduzir ainda mais a taxa de renovação da região.

Outra região que deve ter atenção e onde os processos de mistura devem ser estudados com maiores detalhes, é a região próxima à Ilha Grande, que apresenta uma baixa taxa de renovação, comparada com outras regiões da baía. Esta região pode ser identificada como a zona de mistura, conforme é mostrado na figura 01, com a formação de possíveis áreas de estagnação, que possui as menores taxas de renovação. Comparando os resultados do cenário de 2019 com os cenários de 2100, para os dois cenários de mudança climática (2100), é possível verificar um aumento dessas regiões de estagnação. Essa região também é afetada pelos cenários de mudanças climáticas, com cenários com elevação do nível médio do mar, reduzem ainda mais a renovação, principalmente para o período de inverno em que a taxa de renovação cai cerca de 10% e a idade da água é aumentada em aproximadamente 8 dias.

As figuras 57 e 58 mostram a comparação entre os cenários através das isolinhas da substância marcadora de idade da água para a baía da Babitonga, e apresentam resultados inversamente proporcionais aos constatados para as taxas de renovação.

FIGURA 55 - Isolinhas de Taxa de Renovação (%) para os diferentes cenários de verão a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5 simulados para 90 dias.

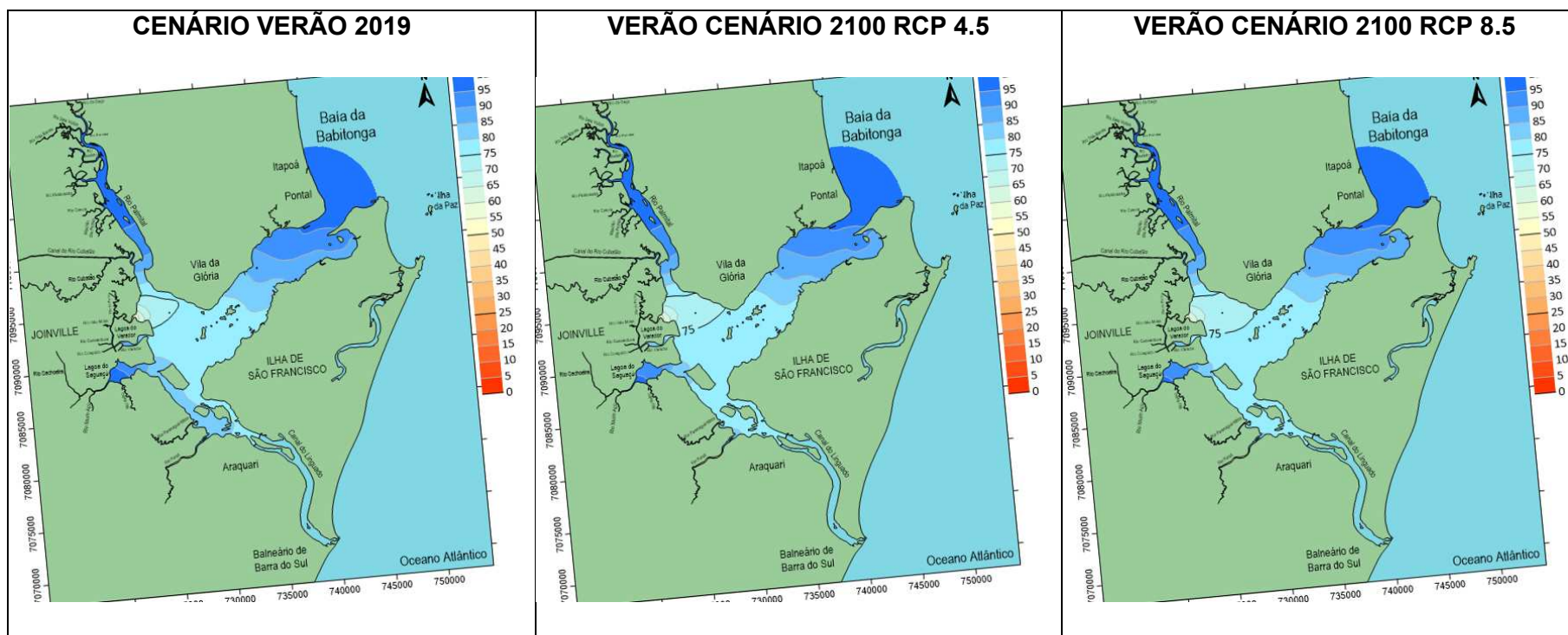


FIGURA 56 - Isolinhas de Taxa de Renovação (%) para os diferentes cenários de inverno a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5, simulados para 90 dias.

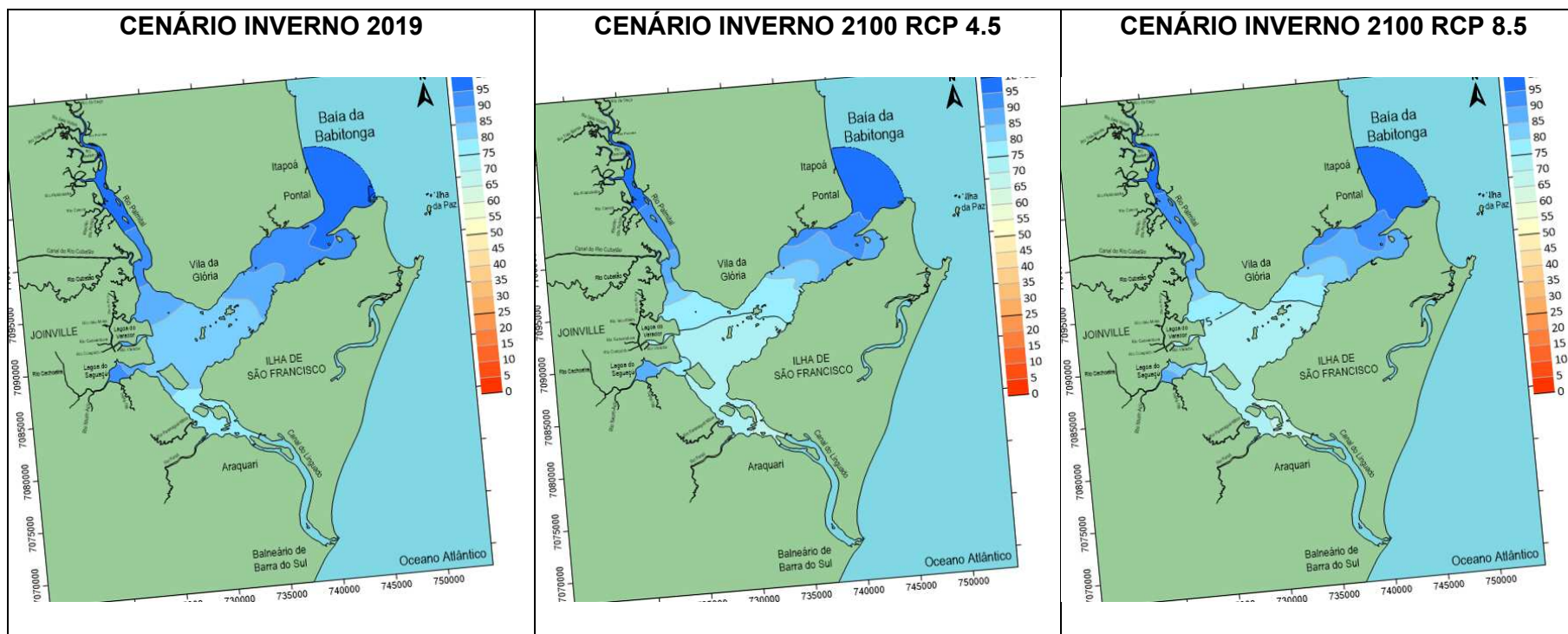


FIGURA 57 - Isolinhas de Idade da Água (dias) para os diferentes cenários de verão a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5 simulados para 90 dias.

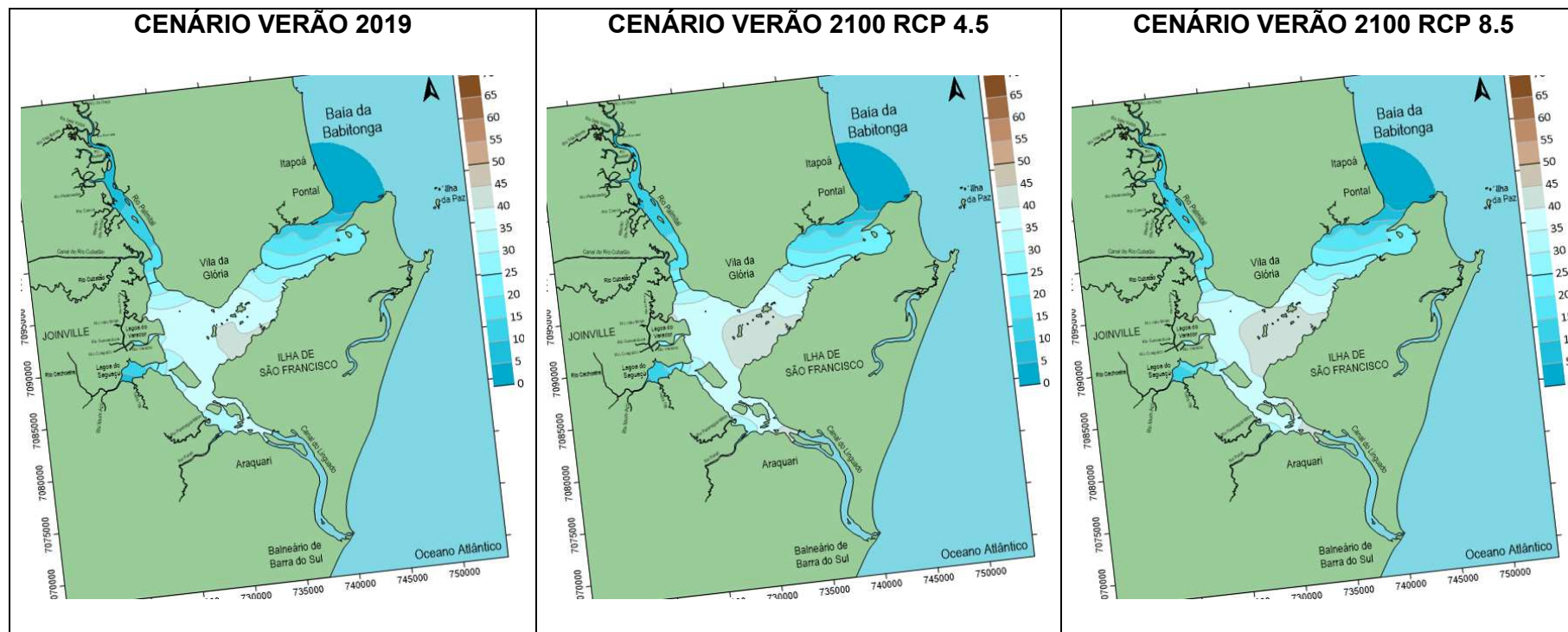
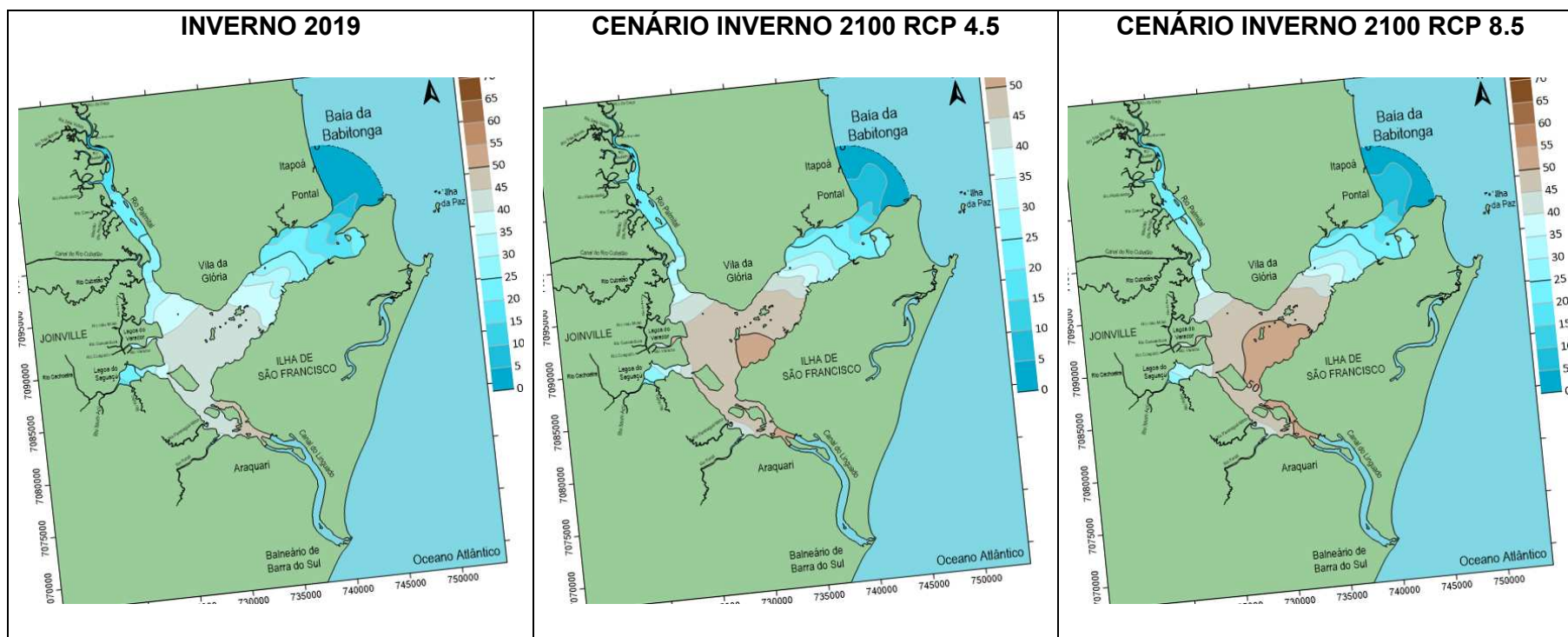




FIGURA 58- Isolinhas de Idade da Água (dias) para os diferentes cenários de inverno a) 2019, b) 2100 RCP 4.5 e c) 2100 RCP 8,5, simulados para 90 dias.



#### 4.6 APLICAÇÕES PRÁTICAS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Ao analisar as variações na circulação hidrodinâmica da baía da Babitonga, considerando a elevação do nível médio do mar é possível notar um aumento da posição da superfície livre proporcional a elevação do NMM e variações nos módulos de velocidade do estuário, podendo refletir em consequências severas para a região.

Em estudo realizado por Hanson et al. (2011), considerando um aumento de 50 cm do NMM entre os anos de 2050 e 2070, e com a intensificação de 10% nos níveis extremos de água devido às tempestades tropicais e extratropicais para diversas cidades do mundo, constatou-se, que, em 36 cidades situadas em deltas e nas quais esse fenômeno já é observado, ocorreu um aumento de inundações, consequência do aumento de até 1,5 metro nas cidades sujeitas à combinação destes fenômenos.

Atualmente, os municípios do entorno da baía da Babitonga já sofrem com problemas de inundações em decorrência de eventos meteorológicos, combinados com preamar de sizígia, sendo que alertas de risco de inundação são emitidos frequentemente para a população pela Defesa Civil de Santa Catarina. Com as possíveis elevações do nível médio do mar, combinada com a intensificação dos eventos meteorológicos esperado pelos cenários futuros, é possível que os municípios fiquem ainda mais suscetíveis às inundações severas. Portanto, medidas de planejamento urbano devem levar essas projeções em consideração.

Braun e Aumond (2017), ao fazerem simulações considerando a elevação do nível médio do mar na cidade de Joinville (SC), já indicavam que os ecossistemas naturais e urbanos do município iriam sofrer alterações. Para melhor avaliação das consequências deste aumento do nível médio do mar em relação as inundações, é sugerida a realização de novos estudos que considere uma ampliação da malha, e do domínio de modelagem, afim de conseguir propagar e investigar as possíveis áreas que sofrerão inundações.

As velocidades de corrente também sofreram alterações com o aumento do nível médio do mar, sendo intensificadas nos canais principais, com maiores velocidades de fluxo e afluxo da maré que, certamente, geram alterações nos transportes de sedimentos da baía da Babitonga, mudando as áreas onde ocorrem erosão e sedimentação, causando possíveis alterações batimétricas, que modificam a circulação da baía. Além destas alterações influenciarem em processos relevantes de transporte e dispersão de materiais dissolvidos e em suspensão, incluindo larvas de peixes e poluentes.

Os processos de troca de massas de água entre o oceano adjacente e as vazões fluviais, formando a região de mistura do estuário, é consequência direta da hidrodinâmica. Portanto, com as alterações hidrodinâmicas e nos indicadores de mistura, como as taxas de renovação e a idade da água, foi possível notar que, para os cenários de 2100 com RCP de 4.5 e de 8.5, houve uma redução das taxas de renovação, que chegaram a uma diferença média, em comparação com 2019, de 1,21% e 1,71 % para o verão e de 6,97% e 8,16% para o inverno, respectivamente. Já para idade da água houve uma variação média para os cenários de 2100 com RCP 4.5 e 8.5, em comparação com os cenários de 2019, de 1,78 dias e 2,36 dias para o verão e de 5,72 dias e 6,69 dias para o inverno.

De Andrade (2018), ao estudar a relação entre a qualidade da água, as taxas de renovação e a idade da água, constatou-se que locais com lentas renovação das águas se tornam mais vulneráveis à poluição por lançamento de esgoto ou poluentes. Deste modo, a redução das taxas de renovação e aumento da idade da água reduzir a capacidade de trocas das massas de águas no interior da baía, fazendo com que regiões, que hoje já mostram tendência de acúmulo de poluentes, sejam ainda mais afetadas. Além destas regiões, locais que atualmente não sofrem com este problema, ficarão mais suscetíveis a terem problemas futuros.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar as variações na circulação hidrodinâmica e nos processos de mistura em cenários futuros, a partir das projeções estimadas de elevação do nível médio do mar, para a baía da Babitonga, modelo hidrodinâmico computacional SisBaHiA®.

O modelo resultou em excelentes indicadores estatísticos de calibração e validação do módulo hidrodinâmico, entre os dados medidos nas estações marégrafas do Porto de Itapoá, São Francisco do Sul e late Clube de Joinville. O módulo de transporte de calor, para o parâmetro de temperatura, foi calibrado e validado com a comparação dos dados medidos por Noenrberg et al (2020) no Canal do Palmital, que apesar dos coeficientes de correlação apresentarem valores regulares, o modelo apresentou baixo percentual do erro absoluto relativo médio (MAE).

Com o modelo calibrado e validado, os resultados obtidos pela elevação do nível médio do mar para as estações marégrafas de Itapoá, São Francisco e para o late Clube de Joinville apresentaram uma elevação proporcional à inserida como condição de contorno, porém ao elevar o nível médio do mar as regiões de entorno poderão sofrer maiores riscos de inundação severa.

Ao calcular a taxa de renovação e idade da água, foi possível observar as áreas de maior estagnação das massas de água e pontos críticos que devem ser o foco da atenção em estudos e projetos a serem realizados na baía da Babitonga, sendo estas regiões o Canal do Linguado e a região da Ilha Grande. Foi verificada uma grande variação sazonal nos processos de renovação de parcelas de águas no estuário, assim como foram verificadas as áreas de maior estagnação, constata-se que nas regiões próximas às cabeceiras dos rios encontram-se as melhores taxas de renovação e menores idades da água, como as regiões próximas da lagoa do Saguaçu e o Canal do Palmital.

Visto que, com os cenários futuros, as taxas de renovação sofrem uma redução e há um aumento na idade da água, principalmente nos cenários de inverno, e considerando que o aporte fluvial tem grande influência nos processos de mistura e na renovação das massas de água, sugere-se que em

próximos estudos sejam avaliados os indicadores de mistura com vazões variáveis, e com estimativa das vazões para cenários futuros consideração as contribuições das mudanças climáticas.

## 6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGENDA 21. Conferência das nações unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento - Agenda 21. Rio de Janeiro, 1992.

BAÍAS DO BRASIL. Relatórios. **Baiadobrasil.coppe.ufrj.br**. 2018. Disponível em: [http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel\\_baia\\_babitonga.html](http://www.baiasdobrasil.coppe.ufrj.br/assets/relatorios/rel_baia_babitonga.html). Acesso em: fevereiro de 2021

BILSKIE, M. V., S. C. HAGEN, K. ALIZAD, S. C. MEDEIROS, D. L. PASSERI, H. F. NEEDHAM, AND A. COX. Dynamic simulation and numerical analysis of hurricane storm surge under sea level rise with geomorphologic changes along the northern Gulf of Mexico, **Earth's Future**, 2016, p.177-193.

BRAUN S.; AUMOND J. J. **Simulação de elevação do nível do mar na cidade de Joinville (SC)**. XVII ENANPUR: desenvolvimento, crise e resistência: quais os caminhos do planejamento urbano e regional? – São Paulo. 2017.

BRAUNSCHWEIG F., FERNANDEZ L., **MOHID: Manual do Usuário**, Essentia Editora: Campos dos Goytagazes, 2010.

BUCCI, R F. **Investigação da Estrutura Hidrodinâmica no Litoral Norte Catarinense**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Itajaí – Univali. 2004

CAMARGO, J. M. R. de GUERRA, J. V., & PATCHINEELAM, S. M. Variações Das Forçantes Hidrodinâmicas Junto a Um Campo de Dunas Subaquáticas Na Baía Da Guanabara. **Atlântica**. 2004, 26, p. 05 – 15.

CCJ – **Comitê Cubatão Cachoeira Joinville** – disponível em: <https://www.cubataojoinville.org.br/> - acesso em: 10/07/2021

CHINI, N. The Impact of Sea Level Rise and Climate Change on Inshore Wave Climate: A case study for East Anglia (UK). **Coastal Engineering**. 2010, 57, p. 973-984

COLEMAN, J. M.; WRIGHT, L. D. **Analysis of Major River Systems and Their Deltas: Procedures and Rationale, with two Examples**. Baton Rouge, Louisiana State University Press. 1971, p. 125

CONTI, J. Considerações Sobre As Mudanças Climáticas Globais. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2015, p. 70-75

COOK J. et al. Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. **Environmental Research Letters**. 2013, 8(2), 024024.

CORREIA, Cátia. **Estudo da Variabilidade das Características Físicas e Químicas da Água ao Longo do Baixo Estuário do Rio Arade: Influência**

**De Diferentes Escalas Temporais.** Trabalho dissertativo apresentado à banca avaliadora da Universidade de Algarve. Portugal. 2016.

CRONIN, L. E. **The role of man in Estuarine Processes.** Washington D.C: Estuaries American Association for the Advanced of Science. 1967, p. 667-689.

CUNHA, C. N.; et. al. Efeito das Variações Do Aporte Fluvial E Do Vento Na Circulação Hidrodinâmica E Na Renovação Das Águas De Um Sistema De Lagunas Costeiras Tropicais: Complexo Mundaú-Manguaba. 2021. **Revista Ambiente & Água**, v.16, 1-18.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows.** 1ª ed. Porto Alegre: Artmed. 2005

DE ANDRADE, V. S. **Análise de hidrodinâmica ambiental e de qualidade de água na baía de Guanabara via modelagem computacional.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction.** 2ª ed. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd. 1998, p. 240.

EPAGRI. **Banco de Dados de Variáveis Ambientais de Santa Catarina.** n. 310. Florianopolis: EPAGRI. 2020.

FAIRBRIDGE, R.W. **The Estuary: its Definition and Geodynamic Cycle: Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries.** Interscience Publication, Nova Iorque. 1980, p. 1–35.

FALKENBERG, A. **Estudo Da Dispersão, Mistura E Qualidade Da Água Do Complexo Estuarino De Paranaguá Com Uso De Modelagem Numérica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná – UFPR. 2009.

FIELDER, M., F., M., **Dinâmica Estuarina Em Cenário De Aumento Do Nível Médio Do Mar: estuário de Santos**, SP. São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo - USP. 2015.

FREITAS, P. P. **Modelagem Hidrodinâmica Da Circulação Sobre A Plataforma Continental Do Ceará - Brasil.** Dissertação de mestrado em Ciências Marinhas Tropicais. Universidade Federal do Ceará – Instituto de Ciências do Mar. 2015.

FUNDAÇÃO COPPETEC. **Estudo técnico de apoio ao desenvolvimento do plano de adaptação da cidade do Rio de Janeiro às mudanças climáticas – EPA/PA- PPE-18954**, de 08 a 12/2015.

HANSON, S. et al., A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes. **Climate Change.** 2011, p. 89-111.

IPCC. **Climate Change:** The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 4ª ed. Reino Unido: Imprensa da Universidade de Cambridge. 2013.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**: Climate Change. 5ª ed. Estados Unidos da América. 2014.

KACZMAREK, Z. Impactos da Mudança Climática no Sistema de Abastecimento de Água na Bacia Hidrográfica do Rio Warta, Polônia. **International Journal of Water Resources Development**. 1996, p. 165 -180.

KNIE, J. L. W; FATMA. **Atlas ambiental da região de Joinville: complexo hídrico da Baía da Babitonga**. 7ª ed. Florianópolis: Fatma. 2002, p.139

MARENGO J. A.; SOUZA, C. **Mudanças Climáticas: Impactos E Cenários Para A Amazônia**. Instituto Nacional Da Ciência E Tecnologia (INCT) Para Mudanças Climáticas. 3ª ed. São Paulo. 2018.

MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. **Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling**. Taylor & Francis Group, CRC Press Inc. 1999.

MARTINS; T. S. **Caracterização Hidrodinâmica E Teste Do Modelo De Transporte Lagrangeano Para Avaliar A Retenção De Ovos E Larvas De Peixe Na Baía De Babitonga, Santa Catarina – Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Vale do Itajaí – Univalli. 2011.

MAZZER, A. M.; GONÇALVES. M. L. Aspectos geomorfológicos da Baía da Babitonga, Santa Catarina, Brasil: Caracterização Morfométrica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 2011, p. 115-120.

MELLO Y.; KOEHNTOPP P. I.; OLIVEIRA T. M. N. Distribuição pluviométrica na região de Joinville (SC). **Estudos Geográficos, Rio Claro**. 2015, 13(1): 78-93.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios da Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 2012.

MIRANDA, T. F. **Resposta Da Hidrodinâmica Do Complexo Estuarino De Paranaguá-PR A Sistemas Frontais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos Ambiental. Universidade Federal do Paraná - UFPR. 2016.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**. 1970, 10, p. 282-290.

NOERBERG, M., A et al. Seasonal and fortnightly variability of the hydrodynamic regime at Babitonga Bay. **Regional Studies in Marine Science**. 2020. 40: 101518.

PAITACH, R. L.; SIMÕES-LOPES, P. C.; CREMER, M. J. Tidal and Seasonal Influences in Dolphin Habitat Use in a Southern Brazilian Estuary. Barcelona, Espanha. **Scientia Marina**. 2017, 81, p. 49-56.

PARKER, B. B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). In: B.B. Parker (ed.). **Tidal hydrodynamics**. John Wiley & Sons, New York, p. 237-268, 1991.



PEREIRA, L. & NETO, J. M. **Estuários. Rios de Portugal - Comunidades, Provessos e Alterações**. Imprensa da Universidade de Coimbra (IUC) - Coimbra University Press. 2019, p.381-421.

POLLI, B. A. outros autores. Evaluation of the impacts caused by wind field and freshwater flow variations due to climate change on the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil. **Regional Studies in Marine Science**. 2021, 47: 101933.

PRANDLE, D.; LANE, A. Sensitivity of Estuaries to a Sea Level Rise: Vulnerability indices. **Est Coast Shelf Sci**. 2015. 160, p. 60-68.

PRITCHARD, D. W. Estuarine Circulation Patterns. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng**. 1955. 81, p. 1-11.

Projeto SMC-Brasil. **Mma.gov.br**. 2018. Disponível em: [www.mma.gov.br/publicações-mma](http://www.mma.gov.br/publicações-mma). Acesso em: abril de 2021.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA**. Rio de Janeiro: COPPE. 2021.

ROSMAN, P. C. C.; CUNHA, C. L. N. **Sobre Cheias em Joinville devido às Marés na Baía de Babitonga**. Vitória: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 1997.

ROSS, A. C.; RAYMOND, G. NAJJAR, A, MING, L. , MANN, M. E.; FORD, S.; KATZ, B. Sea-Level Rise and Other Influences On Decadal-Scale Salinity Variability. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 2015. 157, p. 79-92.

ROVERSI, F.; *et al.* Análise Da Renovação Das Águas Do Sistema Estuarino De Santos Usando Modelagem Computacional. **Rev. Ambiente**. 2016. 11, p. 566-585.

SANCHEZ, A. **Atividades Humanas e Mudanças Climático-Ambientais: Uma Relação Inevitável**. 2009. Dissertação de Mestrado - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – USP.

SCHETTINI, C. A; CARVALHO. J. L; Caracterização hidrodinâmica do estuário do rio Cubatão, Joinville. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**. 2010, 3(1), p. 87-97.

SILVA, L. F. **Alterações morfodinâmicas do Canal do Linguado pela remoção do dique que o separa da Baía da Babitonga-SC**. 2011. 198p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2011.

TRUCCOLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. Marés Astronômicas na Baía da Babitonga, SC. **Notas Técnicas da Facimar**. 1999. 17, p. 57-66.

USACE-HEC. **HEC-RAS - User's Manual**, 2016.

VAN VUUREN, D. P.; *et al.* The Representative Concentration Pathways: An Overview. **Climatic Change**. 2011. 109, p. 5-31

VENTURA, C. **Tecnologias Sociais De Convivência Com O Semiárido Baiano: Estratégia Para A Governança Global Do Clima**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Administração. Universidade Federal da Bahia – UFBA. 2011

VERÇOSA, L. F. M. **Modelagem Hidrológica E Hidrodinâmica Aplicada À Avaliação Da Ocorrência De Inundações Na Cidade De Recife, PE**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco – Recife/PE. 2019.

VIEIRA, C.V. **Evolução Paleogeográfica Da Planície Costeira Do Extremo Norte Da Ilha De São Francisco Do Sul, Santa Catarina, Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis. 2015

VIEIRA, C.V; *et al.* Caracterização Morfossedimentar E Setorização Do Complexo Estuarino Da Baía Da Babitonga/SC. **Boletim Paranaense de Geociências**. 2008, n. 62-63, p. 85-105.

WALSTRA, D. J. R.; *et al.*, **Offshore Sand Pits**: Verification and Application of Hydrodynamic and Morphodynamic Model. Países Baixos: Delft. 2002, p. 14.

WL DELFT HYDRAULICS, **Delft3D-Flow user manual**, versão 3.15, 2021.

YANG, Z.; WANG, T.; VOISIN, N.; COPPING, A. Estuarine Response to River Flow and Sea-Level Rise Under Future Climate Change and Human Development. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 2015. 156, p. 19-30.

ZACARIAS, N. G. R. **Influência da Batimetria e do Caudal Fluvial na Propagação da Maré no Estuário do Rio Minho**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Évora – Portugal. 2011.

ZHANG, W. G., WILKIN, J. L.; SCHOFIELD, O. M. Simulation of Water Age and Residence Time in New York Bight. **Journal of Physical Oceanography**. 2010, 40, p. 965–982.